



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA
DE MINAS Y ENERGÍA



Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS TÉRMICO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA

**Thermal analysis of electrical systems through
numerical simulation**

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Energéticos

**Autor: Javier Ruiz Ortiz
Director: Pablo B. Castro Alonso
Convocatoria: Septiembre 2021**

ÍNDICE PRINCIPAL

1.-INTRODUCCIÓN.....	Pág.5
2.-ALCANCE Y OBJETIVOS.....	Pág.8
3.-ESTUDIO DEL ARTE.....	Pág.9
4.-METODOLOGÍA.....	Pág.13
5.-RESULTADOS.....	Pág.20
6.-CONCLUSIONES.....	Pág.37
7.-BIBLIOGRAFÍA.....	Pág.39

ÍNDICE GENERAL

1.-INTRODUCCIÓN.....	Pág.5
2.-ALCANCE Y OBJETIVOS.....	Pág.8
2.1-ALCANCE.....	Pág.8
2.2.-OBJETIVOS.....	Pág.8
3.-ESTUDIO DEL ARTE.....	Pág.9
3.1.-CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MÉTODO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	Pág.9
3.2.-CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	Pág.9
3.2.1.-Termómetros de contacto de expansión... ..	Pág.9
3.2.2.-Termómetros eléctricos.....	Pág.9
3.2.3.-Termómetros ópticos.....	Pág.9
3.3.-OTRA CLASIFICACIÓN DE MEDIDORES DE TEMPERATURA.....	Pág.11
3.3.1.-Medidores de temperatura superficial.....	Pág.11
3.3.2.-Medidores de temperatura por infrarrojos... ..	Pág.11
3.3.3.-Analizadores de temperatura ambiente... ..	Pág.11
3.3.4.-Medidores de temperatura de penetración.....	Pág.11
3.3.5.-Tiras de medición de temperatura..... ..	Pág.11
3.3.6.-Cameras termográficas.....	Pág.11
3.3.7.-Registradores térmicos.....	Pág.11
3.4.-METODOLOGIA DE MEDICIÓN EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS AEREOS.....	Pág.11
3.4.1.-Métodos de medición indirecta..... ..	Pág.12
3.4.2.-Metodos de medición directa..... ..	Pág.13
3.4.2.1.-Medición de temperatura.....	Pág.13
3.4.2.2.-Medición de ángulo.....	Pág.14
3.4.2.3.-Monitorización de un punto del conductor	Pág.14

3.4.2.4.-Monitorización en base al movimiento inducido por el viento.....	Pág.15
3.4.2.5.-Monitorización directa de distancia.....	Pág.15
3.4.2.6.-Monitorización de tensión.....	Pág.15
3.4.2.7.-Monitorización DGPS.....	Pág.16
3.4.3.-Metodología americana.....	Pág.16
4.-METODOLOGÍA.....	Pág.17
4.1.-DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO TEÓRICO.....	Pág.17
4.2.-DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PRÁCTICO.....	Pág.17
4.2.1. - Engineering Data.....	Pág.19
4.2.2. – Geometry.....	Pág.19
4.2.3. – Model.....	Pág.20
4.2.4. – Setup.....	Pág.21
4.2.5.-Solution.....	Pág.23
4.2.6. -Results.....	Pág.23
5.-RESULTADOS.....	Pág.24
5.1.- PLANTEAMIENTO DEL CASO INICIAL.....	Pág.24
5.1.1.-Temperatura.....	Pág.24
5.1.2.-Flujo de calor total.....	Pág.25
5.1.3.-Intensidad de campo eléctrico total.....	Pág.25
5.1.4.-Calor generado por efecto Joule.....	Pág.26
5.1.5.-Densidad de corriente.....	Pág.27
5.2.- ANÁLISIS DE MODIFICACIÓN DE VARIABLES.....	Pág.27
5.2.1.- Análisis de la variación de emisividad.....	Pág.27
5.2.2.-Análisis de variación de temperatura.....	Pág.30
5.2.3.- Análisis térmico en función de la incidencia del viento.....	Pág.32
5.2.4.- Análisis térmico en función de la variación del cuerpo de medición térmico.....	Pág.35
5.2.5.- Análisis térmico en función de la variación de la caída de tensión	Pág.37

5.2.6.-Análisis térmico debido a la acción de la radiación solar.....	Pág.40
6.-CONCLUSIONES.....	Pág.43
6.1.-CONCLUSIONES TÉCNICAS DEL CONDUCTOR ELÉCTRICO.....	Pág.43
6.1.1.-Incidencia de condiciones meteorológicas.....	Pág.43
6.1.2.-Incidencia de aspectos técnicos.....	Pág.43
6.2.-CONCLUSIONES FUNCIONALES DEL PROGRAMA DE CÁLCULO.....	Pág.44
6.3.-OTRAS CONCLUSIONES.....	Pág.44
7.-BIBLIOGRAFÍA.....	Pág.45

1.-INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico español ha sufrido durante los últimos años diversos procesos de cambio bien por situaciones económicas y actualmente por la necesidad de búsqueda de una producción más limpia y concienciada con los impactos producidos en el medio ambiente, haciendo esto que se produzcan diversas variaciones en la producción de la misma como se muestra en el gráfico siguiente.

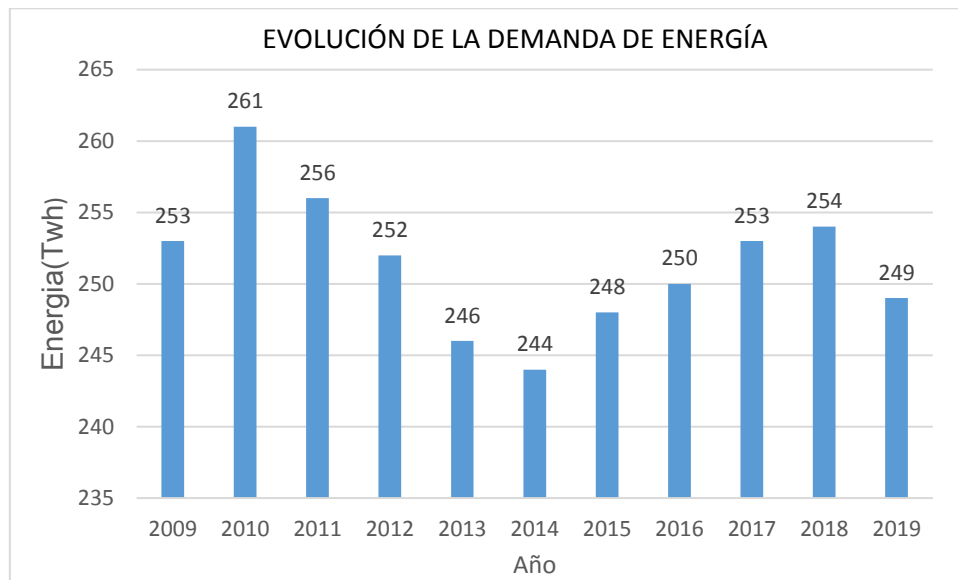


Figura 1.1: Evolución de la demanda de energía últimos 10 años (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”) (1)

Otro de los aspectos que ha tenido gran importancia en la variación del sistema eléctrico ha sido la incursión de las energías renovables y la búsqueda correspondiente de la producción eléctrica mediante energías con menor afección sobre el medio ambiente viéndose reducidos las producciones mediante energías como la nuclear y las térmicas.

En la siguiente figura podemos ver la evolución de la generación renovable y no renovable en los últimos años.

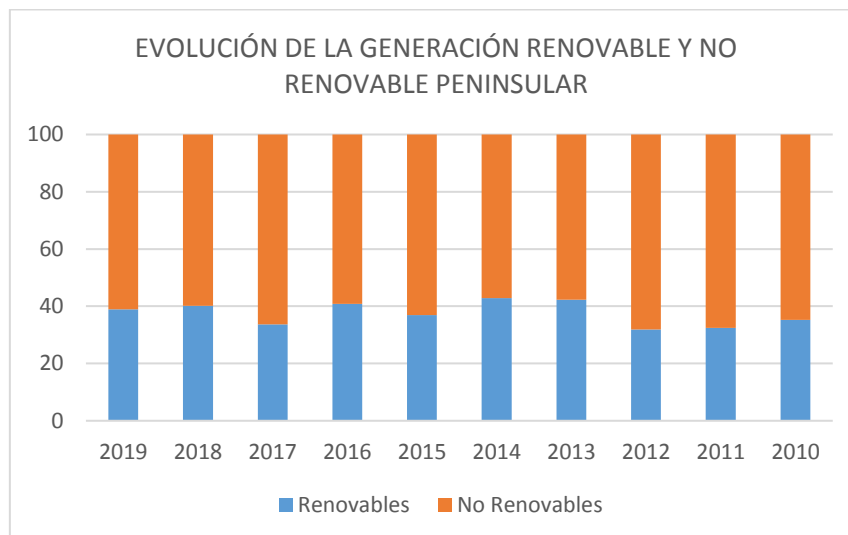


Figura 1.2: Evolución de la generación renovable y no renovable peninsular (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)

El desarrollo de las energías renovables especialmente en el caso de las energías eólica, solar e hidráulica y el aumento de la producción de estas en la busca de la producción de energía más limpia han provocado así mismo la necesidad de desarrollo de los sistemas eléctricos de transporte tanto a nivel de infraestructura como a nivel de sus capacidades de transporte.

De la producción del año 2019 el 39% correspondió a energías renovables del cual un 55,2% corresponde a energía eólica, un 25,7% a hidráulica y un 14,6% a solar tanto térmica como fotovoltaica.

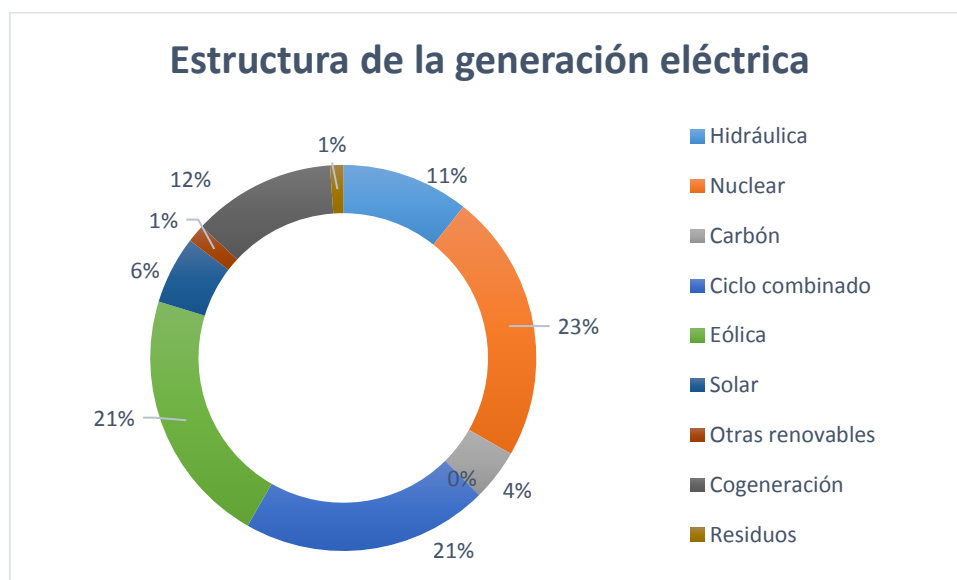


Figura 1.3: Estructura de la generación eléctrica española. Año 2019. (Adaptado del informe del sistema eléctrico español “REE”)(2)

Dentro del desarrollo de la estructura eléctrica española destacan dentro de las energías renovables la energía eólica y la energía solar de las cuales se muestra a continuación la evolución de las potencias instaladas de las mismas.

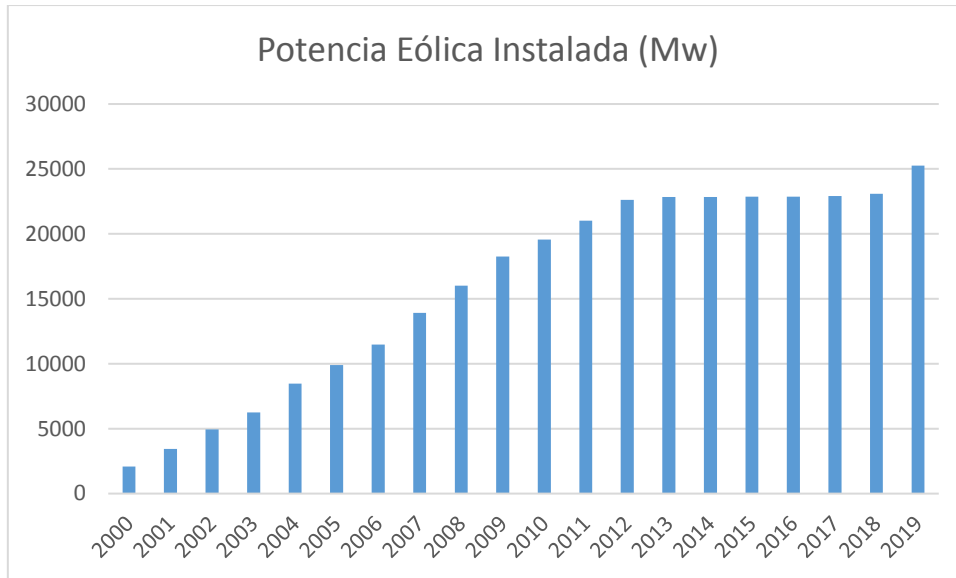


Figura 1.4: Evolución de la Potencia Eólica instalada en España. (3)

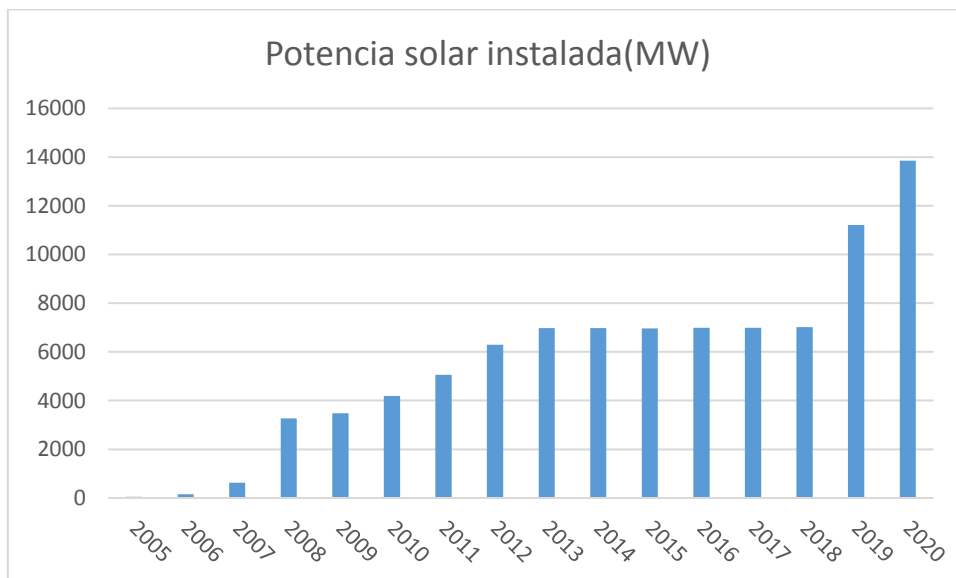


Figura 1.5: Evolución de la Potencia Solar instalada en España. (1)

2.-ALCANCE Y OBJETIVOS

2.1-ALCANCE

El alcance de este trabajo reside en la necesidad de poder aumentar la capacidad de transmisión de energía eléctrica en relación a sus capacidades estáticas o pseudoestáticas en el uso de conductores aéreos, para posibilitar la evacuación de grandes potencias eléctricas sin ser necesario la creación de nuevas líneas eléctricas. Así como posibilitar el conocimiento de la situación térmica de un conductor eléctrico aéreo a través de una simulación de las condiciones a las cuales se encuentra sometido sin ser necesaria la medición presencial del mismo.

2.2.-OBJETIVOS

- Permitir la evacuación de grandes potencias producidas en las centrales de generación en determinados periodos de tiempo.
- Evitar la necesidad de construcción de nuevas líneas eléctricas debido a su alto coste y tiempo de ejecución.
- Evitar la repotenciación de líneas debido a que este proceso implica la indisponibilidad de las mismas durante el periodo de ejecución.
- Empleo de técnicas dinámicas para la optimización de las infraestructuras disponibles.
- Permitir el cálculo de las corrientes máximas que puede soportar un determinado conductor en ciertas condiciones ambientales.
- Permitir la determinación de la temperatura que alcanzaría el conductor al ser atravesado por una corriente elevada.
- Simular las condiciones instantáneas del conductor sin ser necesarias las mediciones de campo.
- Conocer la situación del conductor sin ser necesarios cortes de suministro, ni el contacto con el mismo.

3.-ESTUDIO DEL ARTE

La medición de temperatura es una de las magnitudes medidas con mayor frecuencia. Debido a esto existe gran cantidad de métodos de medición dependiendo de las necesidades de cada aplicación en la que se emplee. Por ello en función de las necesidades se pueden emplear sensores, transmisores y otros dispositivos de medición.

3.1.-CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MÉTODO DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

- Rango de temperatura de trabajo
- Sensibilidad del procesamiento
- Repetibilidad de los parámetros de los sensores
- Precisión de la medición
- Propiedades dinámicas
- Tipo de salida
- Complejidad del transmisor y sistema de medición

3.2.-CLASIFICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Los dispositivos empleados en la edición de temperatura se clasifican en tres grupos en función de las propiedades y características que posean.

3.2.1.-Termómetros de contacto de expansión

Se basan en la expansión térmica de un líquido, aleaciones metálicas o mediante un cambio de la presión, siendo estos de tres tipos posibles:

- Termómetro con tubo capilar
- Termómetros bimetalicos
- Termómetros manométricos

3.2.2.-Termómetros eléctricos

La medición se realiza a través de la utilización de sensores de cambio, los cuales pueden ser:

- de resistencia-de movilidad de transmisores eléctricos
- de concentración de transmisores por los cambios de temperatura

Estos sensores pueden ser de tipo termoelectrico o de resistencia y semiconductores.

3.2.3.-Termómetros ópticos

La medición se realiza mediante el aprovechamiento de los fenómenos ópticos los cuales pueden clasificarse en dos grupos:

- de fibra óptica
- de transductores pirométricos (4)

Además en función del tipo de sensores empleados variaran los costes y la precisión de la medida siendo los siguientes los más empleados en el ámbito de la medición de temperatura.

- Termopar: la medición de la temperatura se realiza a través de la diferencia de voltaje entre dos puntos en los que se conectan dos cables de diferentes metales.

- Sensor RTD: la medición se basa en la relación existente entre temperatura y resistencia, indicando un aumento de resistencia un aumento de temperatura.
- Sensor termistor: su medición es determinada de igual manera que el RTD pero poseen mayor sensibilidad y pueden ser de coeficiente de temperatura negativo, lo que implica q a menor resistencia mayor temperatura.
- Termómetro: la medición se determina por la variación de la dilatación de un líquido.
- Sensor infrarrojo: son sensores sin contacto y miden la radiación electromagnética infrarroja emitida por un cuerpo.(5)

3.3.-OTRA CLASIFICACIÓN DE MEDIDORES DE TEMPERATURA

3.3.1.-Medidores de temperatura superficial

Permiten realizar la medición de temperatura superficial en cuerpos de diversa forma, valores de temperatura diferencial, e incluso determinar la transmitancia en paredes mediante el empleo de sondas térmicas.

- Termómetros de sonda fija
- Termómetros de sonda conectable

3.3.2.-Medidores de temperatura por infrarrojos

Permiten la medición de la temperatura de manera rápida y sin contacto incluso en procesos dinámicos y zonas de difícil acceso.

3.3.3.-Analizadores de temperatura ambiente

Permiten la medición de temperatura del aire de manera precisa.

- Con sonda fija
- Con sonda conectable

3.3.4.-Medidores de temperatura de penetración

Permiten la medición de temperatura en materiales líquidos o semisólidos mediante la penetración de una sonda en dicho material.

3.3.5.-Tiras de medición de temperatura

Permiten la medición de temperatura en un determinado rango de valor al producirse un cambio de color en la misma y la medición de valores máximos indicando de forma irreversible si se ha superado dicho valor.

3.3.6.-Cámaras termográficas

Permiten ver mediante la termografía de los objetos a realizar la medición posibles daños en estructuras en el ámbito de la construcción, fugas en sistemas de calefacción, etc.

3.3.7.-Registradores térmicos

Permiten la medición y el registro de la temperatura en diversos ambientes. (6)

3.4.-METODOLOGÍA DE MEDICIÓN EN CONDUCTORES ELÉCTRICOS AÉREOS

En ocasiones es necesario realizar mediciones de temperatura en las líneas eléctricas pero por motivos de seguridad o accesibilidad no es posible el contacto en el punto de medición y dado que la medición de temperatura en conductores se realiza mediante contacto directo a través de sondas de contacto directo, sensores de tracción, inclinómetros o mediante fibra óptica, supone un gran inconveniente.

Esto unido al aumento de la demanda eléctrica produjo que las líneas se fuesen sobrecargando, llegando a un punto tal que sería necesario la construcción de nuevas líneas eléctricas con su correspondiente elevado coste o la optimización de las existentes, para evitar el daño en los elementos eléctricos que las componen.

Todo esto llevo al estudio de la ampacidad, siendo esta la máxima corriente que puede soportar un conductor eléctrico sin ser dañado, realizándose el estudio de la temperatura que alcanza el mismo, mediante la aplicación de las indicaciones de las normas IEE-738 y CIGRE 144 que describen las modelos térmicos y corrientes para conductores eléctricos.

La primera posibilidad para el cálculo de la temperatura superficial del conductor se basa en la monitorización de las condiciones meteorológicas del entorno del conductor (temperatura, velocidad del viento, humedad, etc.) y conociendo la corriente que circula determinar la temperatura mediante los correspondientes cálculos teóricos que se describen según las normas IEE-738 y CIGRE 144. (7)(8)

La opción intermedia se basaría en la monitorización de la temperatura ambiente y valores prefijados desfavorables de viento y radiación solar. Estas dos primeras opciones tienen el problema de la incertidumbre en la velocidad del viento y el cálculo de la temperatura del conductor.

La otra opción consistiría en monitorizar la temperatura del conductor a través de la colocación de dispositivos adicionales, los cuales crean unas incertidumbres que junto con el coste deciden la viabilidad de la aplicación de esta opción. Mediante la temperatura y el conocimiento de las condiciones meteorológicas se obtendría la corriente y se compararían tanto ésta como la temperatura con las máximas admisibles por el conductor.

Estas opciones llevaran a separar los métodos de medición de temperatura en dos grupos, los de medición directa y los de medición indirecta que a través de otros parámetros permiten la obtención de la temperatura.

Los métodos de medición directa requieren de la medición de al menos un parámetro físico de la línea eléctrica como puede ser la tensión, frecuencia de vibración o distancia al suelo para a través de una de ellas determinar el resto de parámetros. Por el contrario los métodos de medición indirecta se basan en la medición de variables meteorológicas y siendo conocida la condición de carga determinar la ampacidad y límite térmico.

Es necesario tener en cuenta que tanto medición directa como indirecta requiere de un proceso de calibración para una mayor fiabilidad de los resultados dado que ambos se basan en modelos matemáticos.

3.4.1.-Métodos de medición indirecta:

- A través de la medición de la elongación del conductor conforme varia la temperatura.
 - A través de la medición del ángulo entre el conductor y la horizontal mediante el uso de un inclinómetro.
 - A través de la medición del incremento de la flecha del conductor sufre debido al efecto de la temperatura.
- Mediante procesamiento de imágenes.
- Mediante tecnología láser.
- Mediante equipos SAG-PLC que miden la velocidad de propagación de onda.

Estos métodos de medición indirecta precisan de contacto directo entre el equipo de medida y el conductor.

El único método desarrollado que no precisa de contacto con el conductor es mediante la monitorización con onda acústica de superficie SAW. El principal inconveniente de este método reside en la exigencia de calibración en función de la variación de las condiciones atmosféricas. (9)

3.4.2.-Métodos de medición directa

Como se citó anteriormente para la medición directa es necesaria la medición de parámetros físicos de la línea a continuación se describen los diversos métodos existentes dependiendo de la variable que se realice la medición.

3.4.2.1.-Medición de temperatura

La medición directa de temperatura se realiza normalmente mediante termopares de abrazadera que transmiten vía radiofrecuencia la medición a una estación central o son descargados localmente para ser comparados con los valores límite. Se suelen colocar pocos sensores por lo que la temperatura medida no es la promedio y puede haber variaciones a lo largo de los tramos entre sensores y lo que produce errores en el cálculo de la flecha. Por lo que se emplean dos métodos básicamente:

- Método de Sistema de Monitorización de Temperatura (SMT) consiste en la monitorización de la temperatura del conductor mediante la colocación de un sensor de temperatura PT en contacto con el conductor.
- Sistema DTS: consiste en la inserción de fibra óptica en el interior del conductor permitiendo la medición de la temperatura a lo largo de todo el conductor evitando la incertidumbre de medida en lugares puntuales.

3.4.2.2.-Medición de ángulos

La medición de los ángulos de posición del conductor permite el cálculo de la flecha y a través de la pendiente y longitud del vano permite la posibilidad de parametrizar el vano a través de una parábola.

- El método de “Power donut” que se basa en un toroide que se sitúa alrededor del conductor y permite medir la corriente y la temperatura superficial asociada a la corriente y mediante un módulo GSM/GPRS enviar los datos a la estación meteorológica y comprobar el estado del conductor. El inconveniente de este método reside en el módulo de comunicación ya que ocasiona problemas debido al mantenimiento de la SIM como de falta de cobertura en determinadas zonas.



Figura3.1: Imagen del “Power Donut”

3.4.2.3.-Monitorización de un punto del conductor

A través de una cámara de altas prestaciones se monitoriza un punto del conductor con un objetivo situado en él, determinándose la posición del conductor.

La cámara se puede ubicar en cualquier punto de la estructura siendo situada a una altura aproximada a la del objetivo el cual es situado en el conductor. Como parte del proceso de instalación se suelen tomar medidas de la geometría de la catenaria y distancia al suelo.



Figura 3.2: Imagen de la cámara y objetivo”

3.4.2.4.-Monitorización en base al movimiento inducido por el viento

La monitorización se realiza a través de la captación de las vibraciones que produce el viento sobre el conductor, las cuales actúan sobre el a una determinada frecuencia la cual es captada y la cual determina un incremento de la flecha en el conductor. Cuanto mayor sea el incremento de la flecha menores serán las frecuencias.

Todos los aspectos meteorológicos incurren en la producción de una frecuencia por lo que los análisis de frecuencia permiten una evaluación directa de la flecha del conductor y por lo tanto permiten una gran aproximación para la determinación de la ampacidad.



Figura 3.3: Imagen del sensor de vibración

3.4.2.5.-Monitorización directa de distancia

A través de la utilización de ondas de sonido realiza la medición de la distancia del conductor al suelo. Debido a la reflexión de las ondas de sonido se calcula el tiempo de vuelo de la onda lo cual está relacionado con la distancia a través de la velocidad del sonido.

3.4.2.6.-Monitorización de tensión

La monitorización de la tensión se realiza a través de la colocación de un aparato de monitorización de tensión en serie con el aislador de fin de línea, dando una medida precisa de tensión. Conociéndose la tensión, la temperatura de radiación y la distancia y temperatura del conductor se puede obtener el límite de la línea en tiempo real.

El límite térmico de la línea se deriva de la ecuación de balance de calor del conductor es necesario conocer de manera precisa la temperatura.



Figura 3.4: Imagen del monitorizador de tensión

3.4.2.7.-Monitorización DGPS

Este método de monitorización de variación de flecha emplea la colocación de un sistema de posicionamiento global en el punto medio del vano, realizando la medición con gran precisión. La ventaja de este sistema reside en que obtiene de manera directa la flecha a través de la distancia del conductor al suelo siendo esta calculada a través de su altitud en cada momento. (10)

3.4.3.-Metodología americana

Todos estos métodos precisan de contacto entre el conductor y el equipo de medida.

La patente americana desarrollada describe un método de medición directa sin contacto con el equipo de medida, basándose en una abrazadera de emisividad conocida sobre la cual se realiza la medición mediante un sensor de radiación infrarroja consiguiendo poder realizar la medición sobre una superficie plana, eliminando el trenzado. El inconveniente de este proceso se basa en que se producen incertidumbres en la medición del rango de temperaturas si la distancia entre el sensor y la abrazadera es mayor de 1,5 metros así como la imposibilidad de mantener fijo el conductor con las correspondientes variaciones. Además no se detalla cómo realizar la medición así como no tiene en cuenta la variación de la emisividad.

Para la obtención de la temperatura que alcanza el conductor será necesario tener en cuenta diversos aspectos como son los citados a continuación.

- Velocidad y dirección del viento en la zona.
- Monitorización de la temperatura ambiente en el lugar.
- Desplazamiento máximo producido en el conductor y su superficie de incidencia.
- Calibración de los sensores térmicos sin contacto y definición de la emisividad.
- Situar el cuerpo de medición térmica lo más cercano al amarre para minimizar el desplazamiento del cable.
- Aplicación de pasta térmica al cuerpo de medición para facilitar la transmisión de la temperatura del conductor al cuerpo.(9)

4.-METODOLOGÍA

4.1.-DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO TEÓRICO

La metodología a emplear se encuentra basada en el modelo de medición térmica para conductores eléctricos desarrollado por la Universidad de Cantabria y desarrollado en la patente titulada “Método y sistema para la medición directa y sin contacto de la temperatura superficial en un cable” cuyo proceso será descrito a continuación.

Este método busca resolver todos los problemas asociados a las diferentes metodologías ya existentes mediante un método y sistema de medición directo y sin contacto, reduciendo las incertidumbres de medida, aumentando la distancia de medición, teniendo en cuenta la movilidad del cable, disminuyendo los riesgos y unificando sencillez y coste en los diferentes procesos.

El método constaría de un conductor eléctrico el cual se desea monitorizar la temperatura, un cuerpo de medición térmica rodeando al cable y un sensor térmico sin contacto que enfoca al cuerpo de medición térmica.

Partiendo de esta base se podrían analizar diversas alternativas siendo modificados la emisividad del cuerpo de medición térmica y siendo medido mediante laser de infrarrojos o la variación del diámetro, la capacidad de lectura del sensor térmico y su rango de desplazamiento del cable, entre otros aspectos.

4.2.-DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO PRÁCTICO

La realización de este trabajo comprende la implementación del método desarrollado de cálculo de temperatura de conductores aéreos mediante el desarrollo del mismo a través de la simulación de los procesos ocurridos en los mismos a través del programa de cálculo Ansys en este caso se ha desarrollado mediante la versiones ANSYS 2021 R1 y R2 mediante el uso de licencia de estudiante a través de la plataforma Porticada de la Universidad de Cantabria.

Para la realización de esta simulación se partirá en este caso de la aplicación Workbench del programa Ansys la cual nos dota de una serie de posibilidades para la realización de todo tipo de cálculos relacionados con el campo de la ingeniería, bien sean cálculos estructurales, modelos térmicos, sistemas eléctricos, cálculos de fluidos, etc.

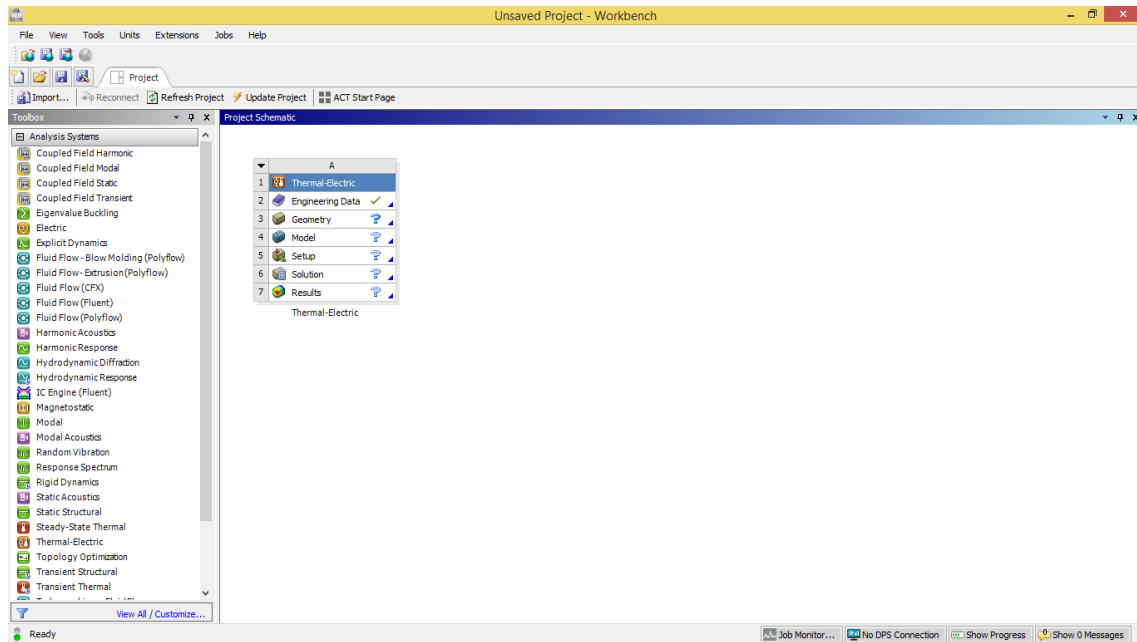


Figura 4.1: Imagen “Workbench de Ansys”

Más concretamente escogeremos un proceso termoelectrico que en este caso es el proceso más adecuado para la simulación de los procesos que se producen al realizar el estudio de un conductor eléctrico y cuya esquematización de proceso es la mostrada a continuación.

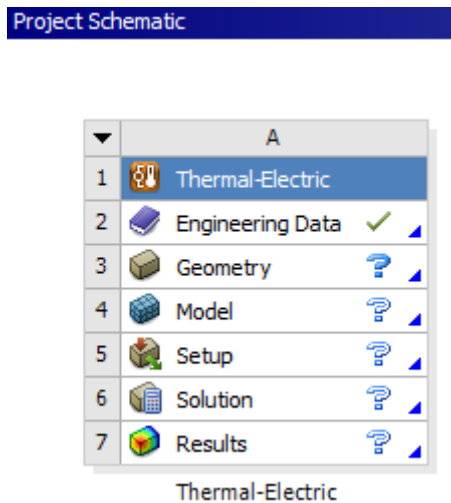


Figura 4.2: Imagen Apartados Proceso Termoelectrico

En este proceso termoelectrico deberemos describir las diferentes propiedades que definen el sistema formado por el conductor para que represente de la manera más exacta posible la realidad.

4.2.1.- Engineering Data

En este apartado se describen cada uno de los materiales que se emplearan en la simulación del conductor, los cuales en este caso serán aluminio y acero, de los cuales se compone el conductor y de los cuales se muestran las propiedades físicas de cada uno de los mismos.

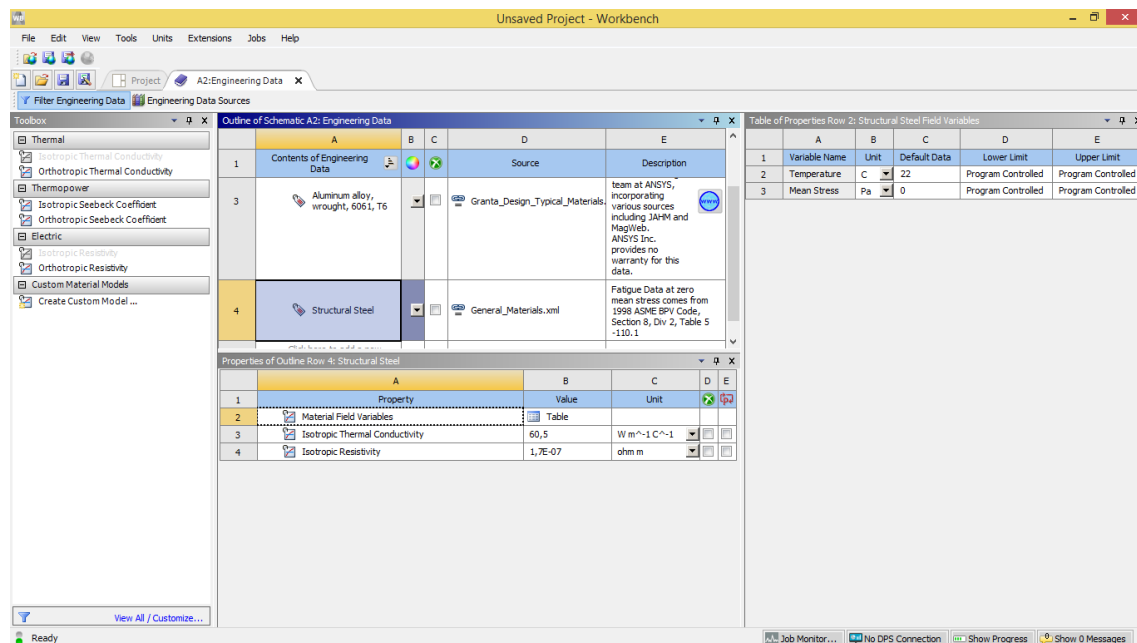


Figura 4.3: Imagen de la selección de materiales

4.2.2.- Geometry

En este apartado se define la estructura del elemento que se va a analizar en nuestro caso definiremos las dimensiones del conductor, así como las dimensiones del cuerpo de medición térmica adherido a él para el cálculo del modelo.

En el caso del conductor eléctrico se representará a través de dos cilindros concéntricos de diámetros equivalentes calculados, correspondientes a la parte de aluminio y acero galvanizado, según la tabla de características del cable empleado.

En este caso, se realizará la simulación a través de un conductor LA-280 HAWK del que seleccionaremos un tramo de 1 metro de longitud y cuyos diámetros equivalentes serán los descritos a continuación.

- Acero galvanizado: 8,04mm.
- Aluminio: 21,8mm.(11)

Para la representación del cuerpo de medición térmico será representado a través de una esfera de aluminio situada alrededor del cable.

- Diámetro del cuerpo medición térmico: 60mm.

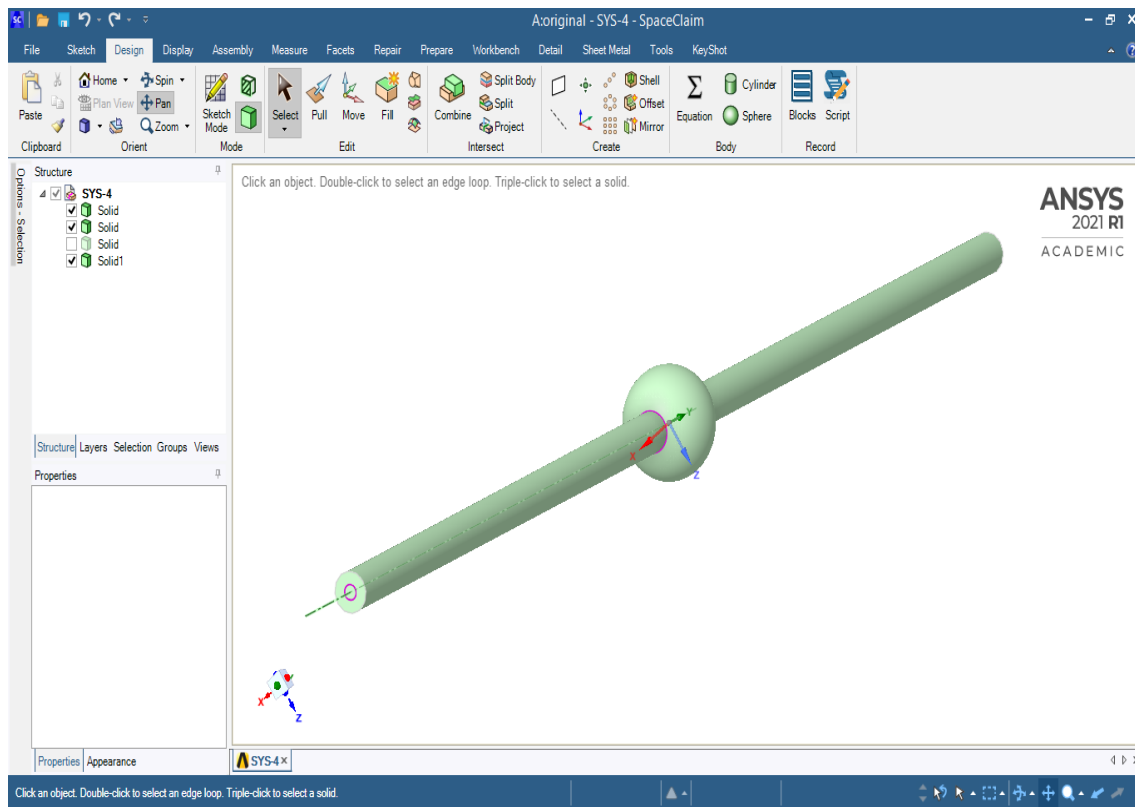


Figura 4.4: Imagen de la Estructura geométrica simulada

4.2.3.- Model

En este apartado se realiza el mallado de la estructura para el posterior cálculo de la simulación teniendo en cuenta que se debe crear una única estructura formada por el alma del cable, las capas exteriores del conductor y el cuerpo de medición térmica, para evitar problemas de continuidad en el mallado y el correspondiente problema de convergencia en el cálculo.

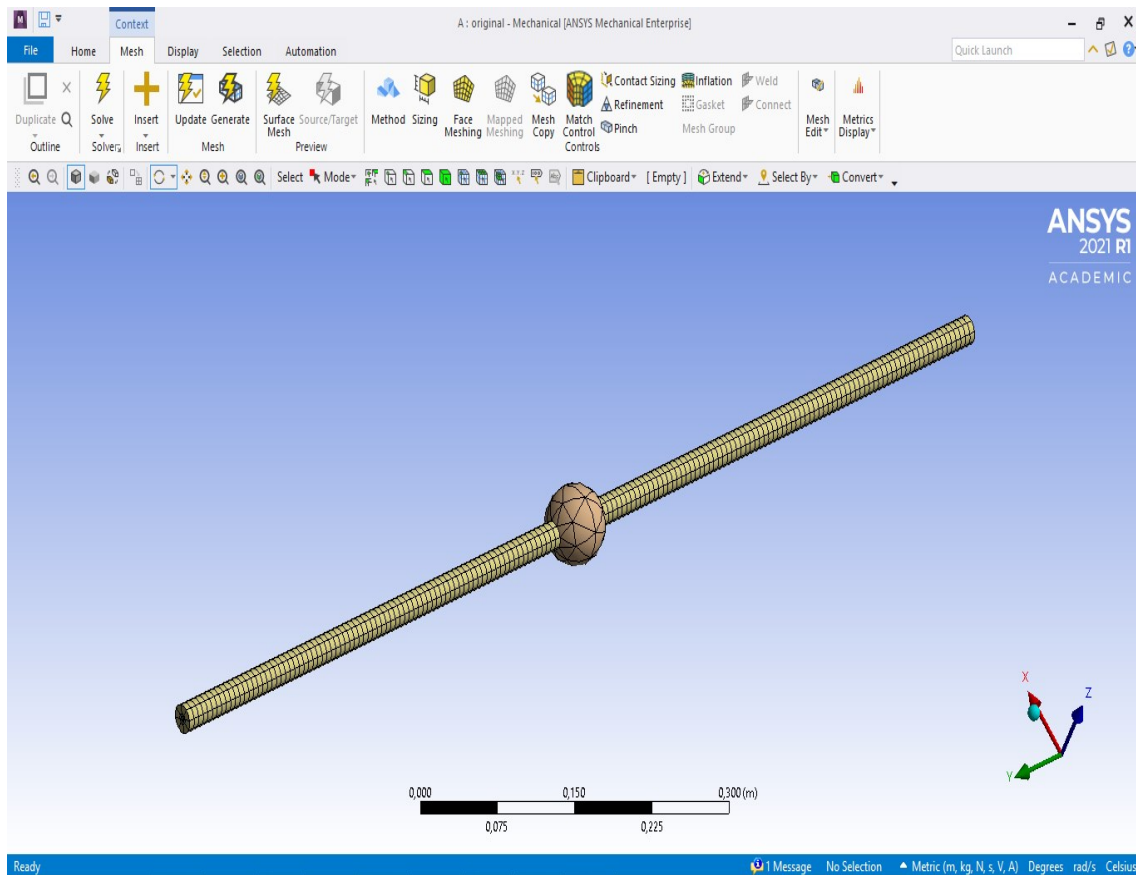


Figura 4.5: Imagen del mallado de la estructura

4.2.4.- Setup

En este apartado se procede a la imposición de los diferentes parámetros de contorno a los que se ve sometido el conductor exteriormente, así como los parámetros relacionados con la situación de carga del cable en el momento de cálculo de la temperatura.

Además en este apartado se especificará cada zona de la estructura diseñada, en este caso constituida por el conductor eléctrico y el cuerpo de medición térmico, de que materiales están fabricados cada uno de ellos siendo en este caso aluminio y acero galvanizado para el conductor y aluminio para el cuerpo de medición térmico.

Para ser más precisos se deben imponer las condiciones de los parámetros siguientes.

- Temperatura.
- Radiación solar (Temperatura, emisividad, superficies de aplicación).

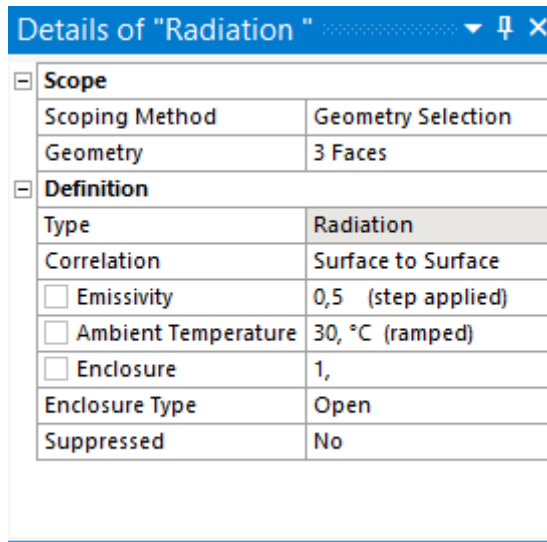


Figura 4.6: Imagen datos relativos a la Radiación

- Viento (Temperatura, coeficiente convectivo, superficies de aplicación).

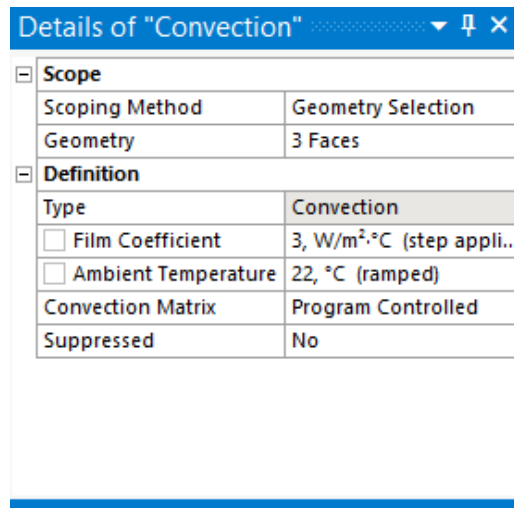


Figura 4.7: Imagen datos relativos a la Convección

- Corriente o caída de tensión.

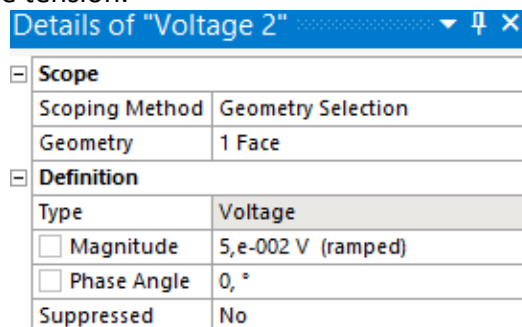


Figura 4.8: Imagen relativa a la caída de tensión

- Análisis settings (Tiempo de simulación, intervalos, tiempo de intervalo).

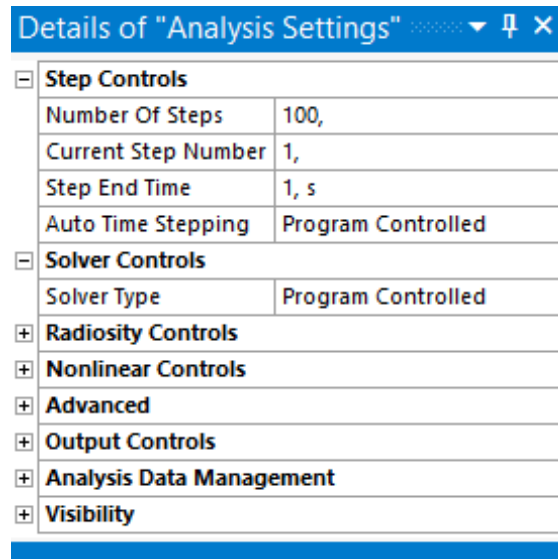


Figura 4.9: Imagen de los inputs del proceso de simulación

4.2.5.-Solution

En este apartado se especificaran cada una de las soluciones que se desean obtener de la simulación del conductor, tanto en parámetros térmicos como eléctricos, como puede ser el caso de:

- Temperatura
- Flujo de calor total
- Flujo de calor direccional
- Tensión
- Intensidad de campo eléctrico total
- Intensidad de campo eléctrico direccional
- Densidad de corriente total
- Densidad de corriente direccional
- Calentamiento Joule

4.2.6.- Results

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la simulación tanto los valores del cálculo como de manera gráfica sobre la estructura a calcular, en nuestro caso el conductor eléctrico y el cuerpo de medición térmico.

5.-RESULTADOS

Tras la simulación del conductor eléctrico se obtienen en función de las condiciones impuestas para la ejecución de la misma los resultados que se mostraran en los apartados descritos a continuación, siendo posteriormente analizados mediante la comparación de resultados en los modelos de temperaturas que alcanza el cable en dichas condiciones a las que se verá sometido.

5.1.- PLANTEAMIENTO DEL CASO INICIAL

Tras haber realizado el diseño de la composición formada por el cable y el cuerpo de medición térmico, así como el mallado de los mismos se deberán implementar el resto de imposiciones para el cálculo.

Para la realización de este primer caso partiremos como se comentó en apartados anteriores de una serie de especificaciones atendiendo a las condiciones ambientales y de contorno a las que se verá sometido el conductor, las cuales son detalladas a continuación:

- Temperatura: 22°C
- Emisividad: 0,5
- Coeficiente convectivo: $3\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$
- Caída de tensión: 0,05V

Atendiendo a estas especificaciones obtenemos los resultados que se muestran en los apartados siguientes.

5.1.1.-Temperatura

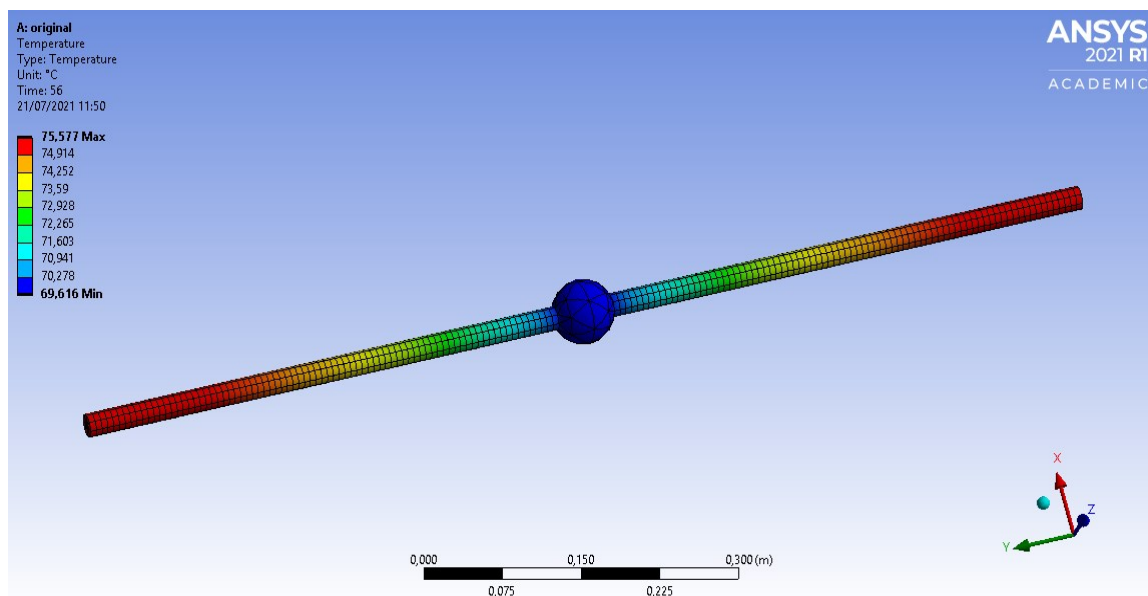


Figura 5.1: Diagrama de temperatura

Como podemos ver el rango de temperaturas varía entre los puntos más alejados del cuerpo de medición térmico donde se alcanzan los valores más elevados hasta el lugar de este con los valores más bajos de temperatura dado que al tener una mayor superficie de contacto el calor generado se dispersa con mayor facilidad.

Para este caso en concreto se realizaran las diversas simulaciones para las diferentes posibilidades de cálculo que nos permite el programa de cálculo, siendo como se muestran a continuación los valores que se mostraran de las distintas magnitudes.

5.1.2.-Flujo de calor total

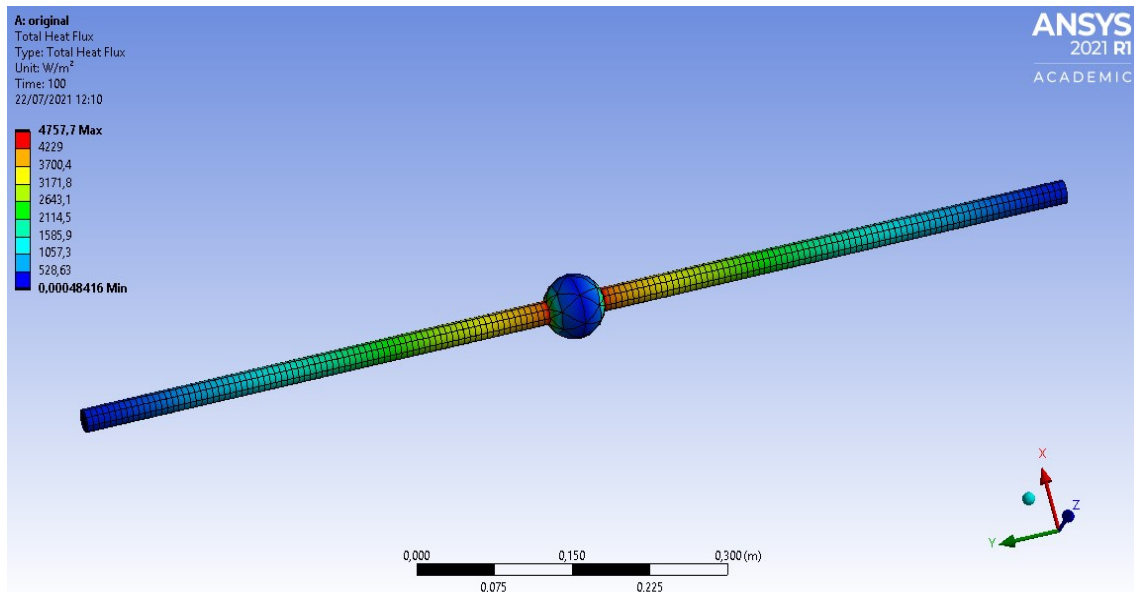


Figura 5.2: Diagrama de flujo de calor total

Como se puede apreciar el flujo de calor se concentra en mayor medida en las zonas cercanas al cuerpo de medición térmico.

5.1.3.-Intensidad de campo eléctrico total

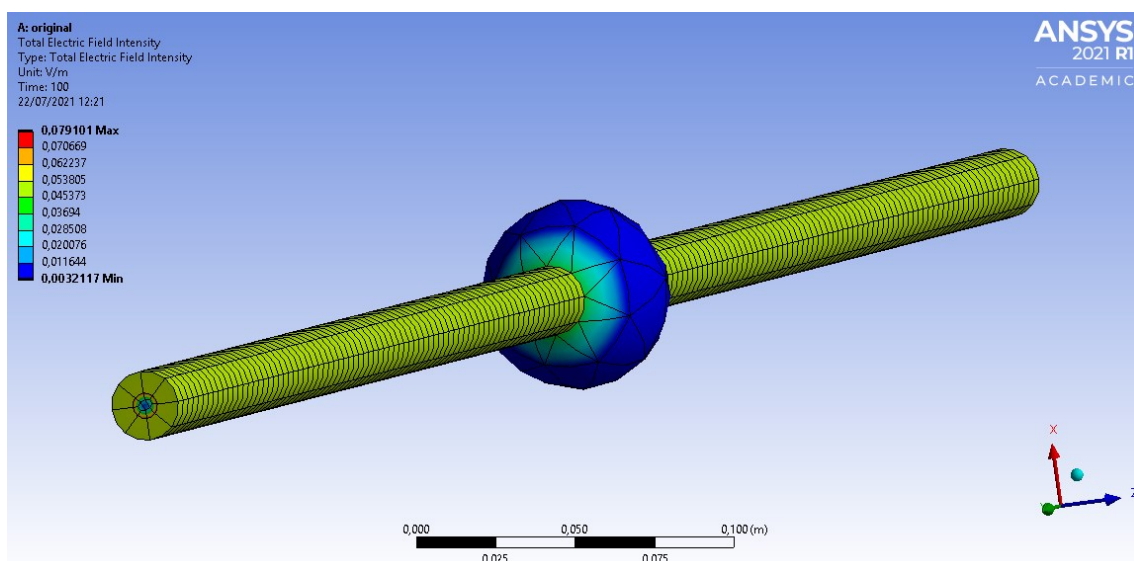


Figura 5.3: Diagrama de intensidad de campo eléctrico

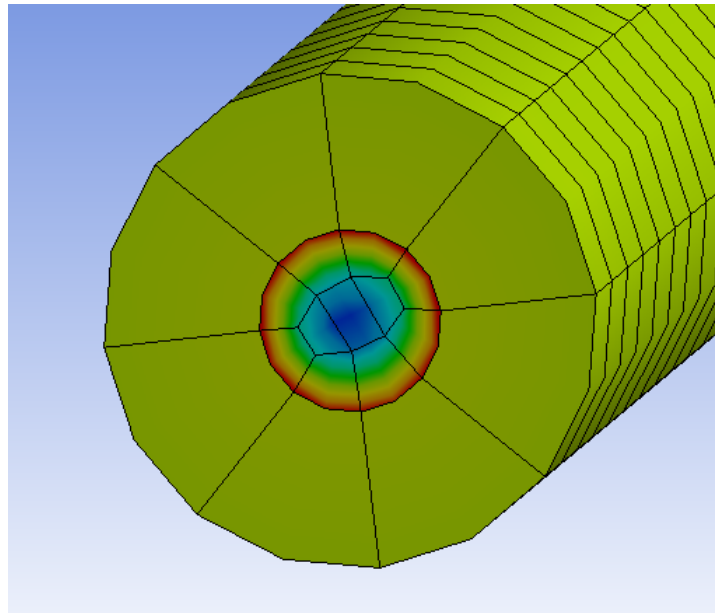


Figura 5.4: Detalle sección del cable del diagrama de intensidad de campo eléctrico

Como podemos observar la concentración de intensidad de campo eléctrico es mayor en el cable que en el cuerpo de medición térmico, más concretamente en la zona de unión entre las capas de acero galvanizado y la zona de aluminio.

5.1.4.-Calor generado por efecto Joule

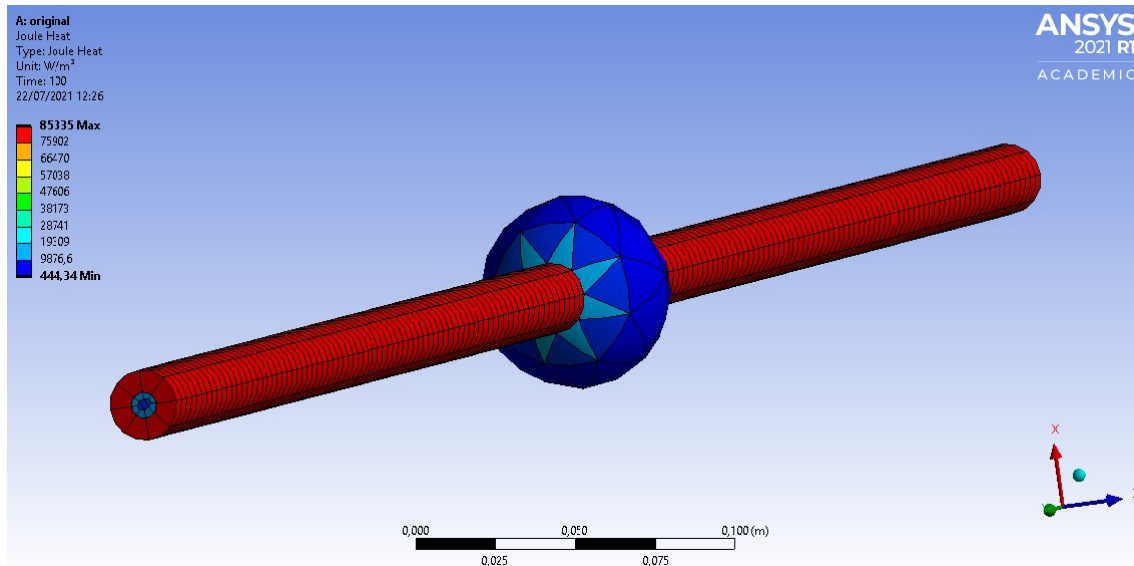


Figura 5.5: Diagrama de calor generado por Efecto Joule

Como se puede comprobar las zonas de mayor generación de calor por efecto Joule son las del aluminio del conductor ya que es en estas en las que se produce la transmisión de corriente eléctrica.

5.1.5.-Densidad de corriente

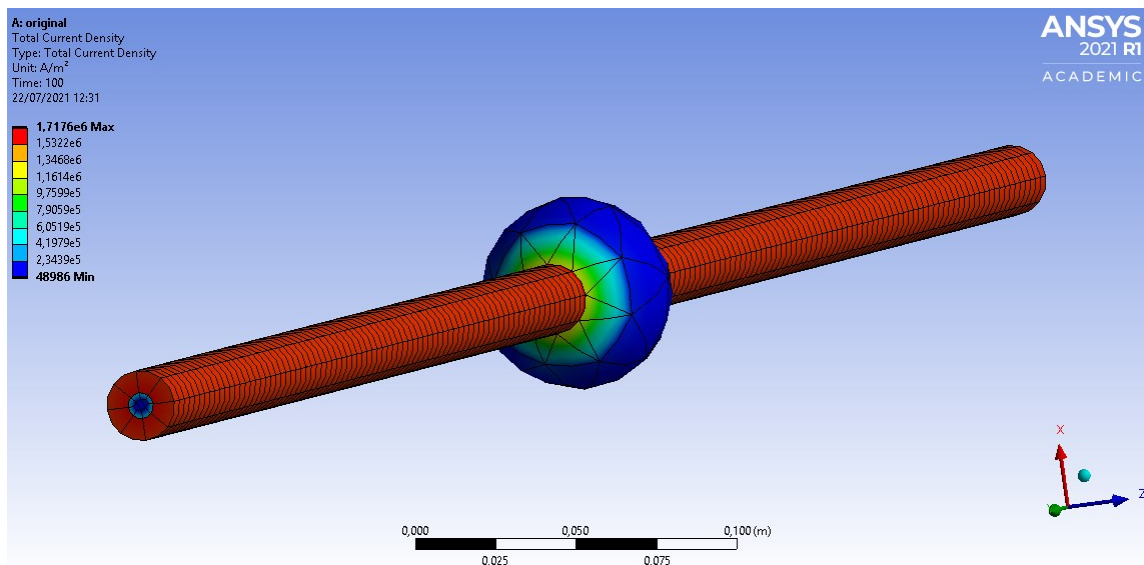


Figura 5.6: Diagrama de densidad de corriente

Al igual que ocurría en el análisis anterior, la zona de mayor densidad de corriente se produce en la zona de aluminio del cable, debido al transporte de la energía en esta zona del conductor.

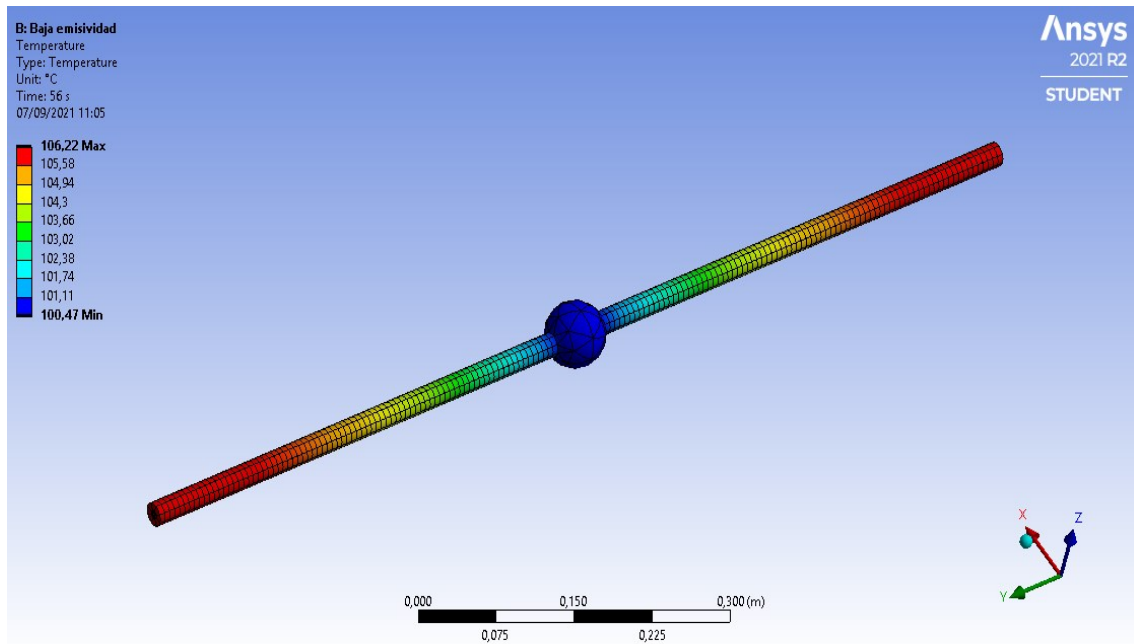
5.2.- ANÁLISIS DE MODIFICACIÓN DE VARIABLES

Todos los casos descritos en sucesivos análisis serán únicamente de objeto de estudio en su temperatura dado que el objetivo principal de este trabajo se basa en el estudio del calentamiento térmico del conductor, debido a las diferentes variables que pueden ser objeto de cambio.

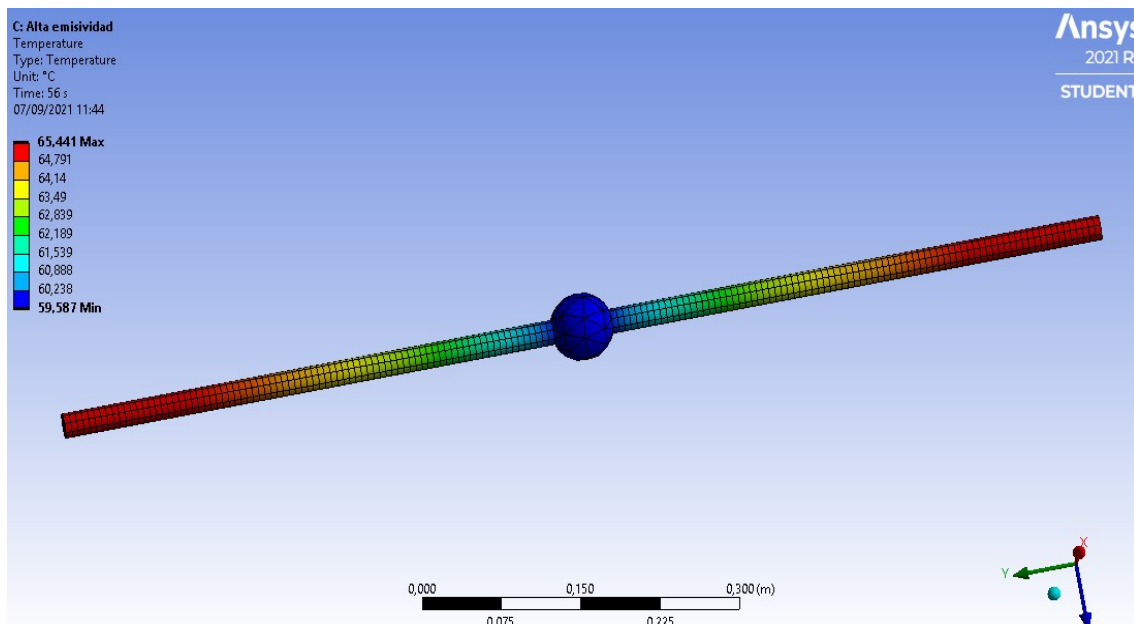
5.2.1.- Análisis de la variación de emisividad

En los dos siguientes casos se han realizado variaciones en los valores de emisividad dado que puede afectar considerablemente a la temperatura del conductor, siendo los resultados los que se muestran a continuación.

Para un primer supuesto de emisividad se tomará un valor de la misma bajo, el cual en este caso se toma de $\epsilon=0,1$ y una temperatura ambiente de 22°C, siendo el perfil térmico del conductor el siguiente.



Para el segundo supuesto se tomará una emisividad alta de $\epsilon=0,8$ y al cual en este caso se le ha asociado una temperatura de 22°C y cuyo perfil térmico es el siguiente.



Tras la realización de las simulaciones anteriores se realiza una comparación entre los datos obtenidos de las mismas, siendo obtenidos la tabla y gráfico comparativo que se muestran a continuación.

Tabla 5.1: Tabla de valor de temperatura en función de su emisividad

$\varepsilon=0,1$	$\varepsilon=0,5$	$\varepsilon=0,8$
106,22	75,577	65,441
105,58	74,914	64,791
104,94	74,252	64,14
104,3	73,59	63,49
103,66	72,928	62,839
103,02	72,265	62,189
102,38	71,603	61,539
101,74	70,941	60,888
101,11	70,278	60,238
100,47	69,616	59,587
101,11	70,278	60,238
101,74	70,941	60,888
102,38	71,603	61,539
103,02	72,265	62,189
103,66	72,928	62,839
104,3	73,59	63,49
104,94	74,252	64,14
105,58	74,914	64,791
106,22	75,577	65,441

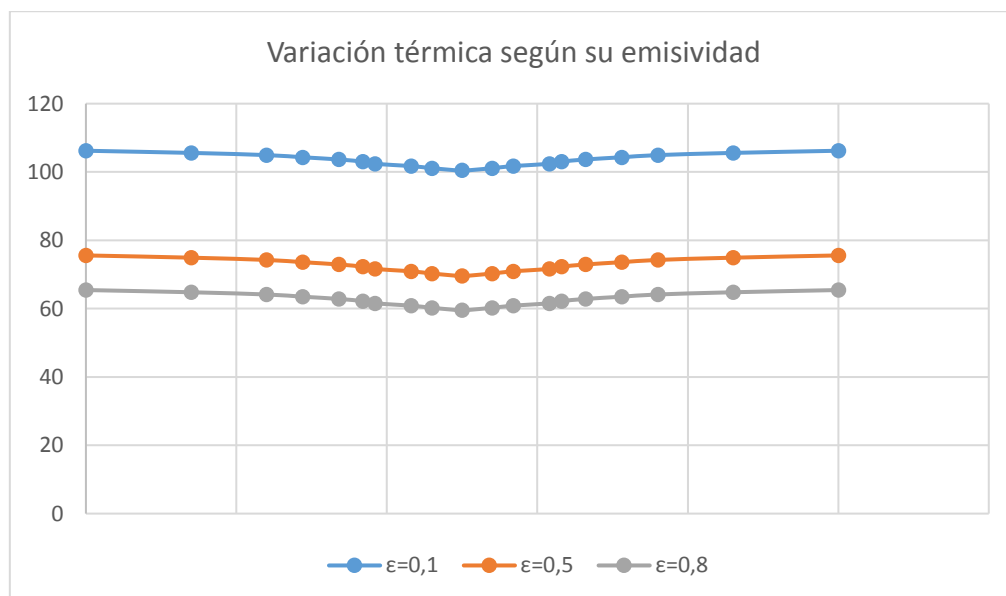


Figura 5.9: Gráfico comparativo de variación térmica según su emisividad

Como se puede ver en las figuras anteriores, el calentamiento del conductor se produce en una mayor medida en función de la disminución del valor de emisividad en que se encuentre, siendo mucho menor el descenso de la temperatura cuanto mayor sea la proximidad a 1 del valor de la emisividad.

5.2.2.-Análisis de variación de temperatura

En los siguientes supuestos planteados se estudia cómo afecta un incremento de la temperatura de contorno del conductor, en la temperatura que puede alcanzar este, viendo como afectara esto a las propiedades del mismo.

En el caso planteado a continuación se someterá al conductor eléctrico a una temperatura baja, en este caso será de 5°C, para ver el efecto a bajas temperaturas en el cable y siendo el perfil térmico que se alcanza con la simulación el mostrado a continuación.

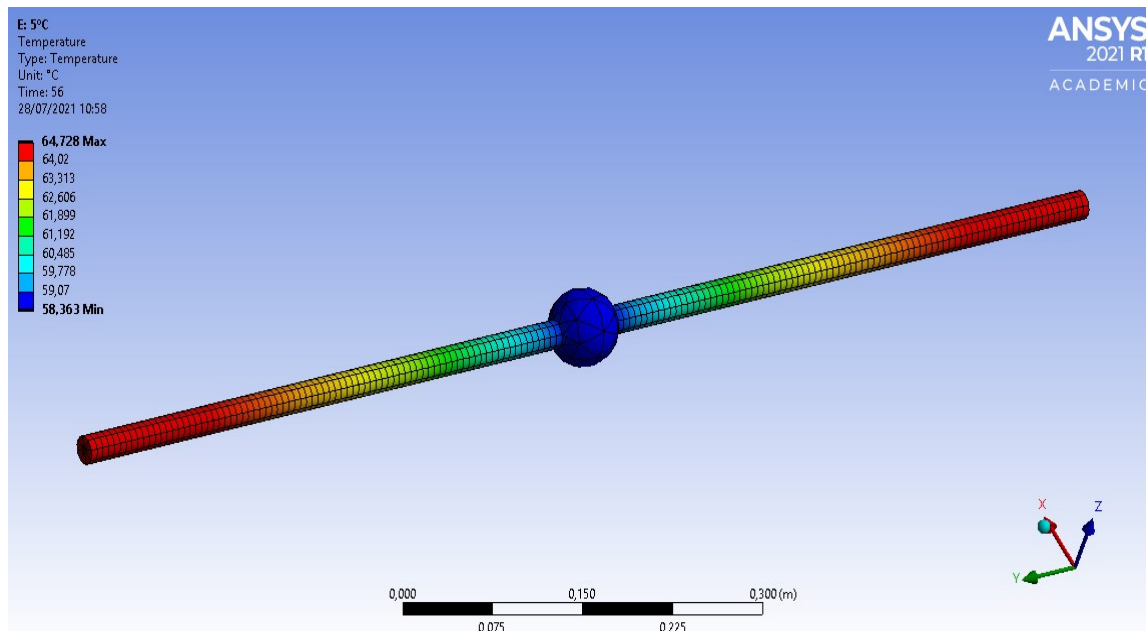


Figura 5.10: Diagrama térmico para temperatura de 5°C

En un segundo caso se plantea un incremento de temperatura para alcanzar una temperatura de 50°C, mostrando se a continuación el perfil térmico resultante de la simulación.

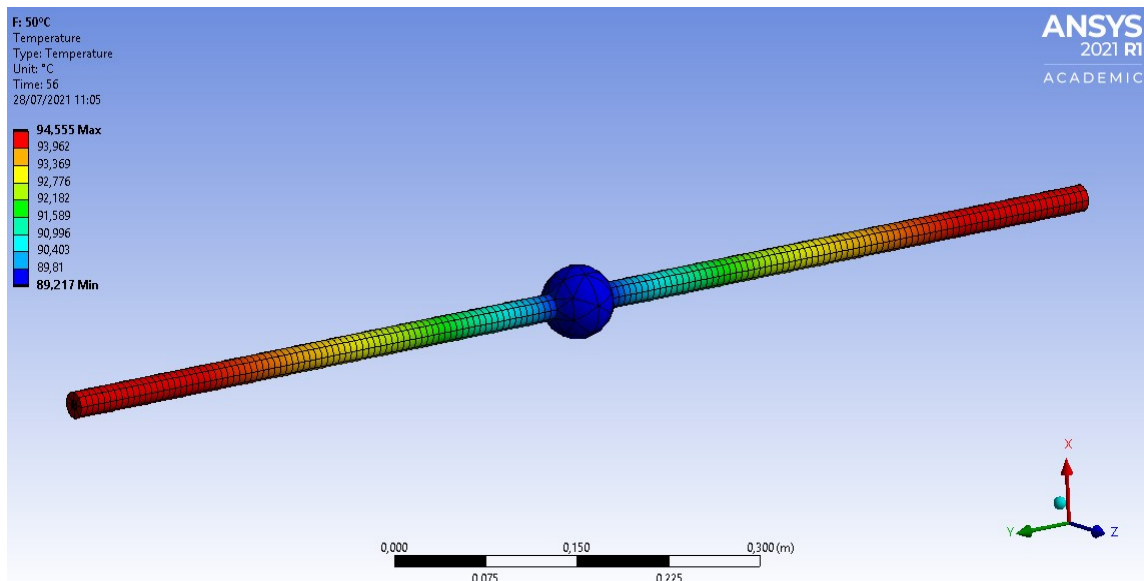


Figura 5.11: Diagrama térmico para temperatura de 50°C

A continuación se muestran a través de una tabla de valores y de un gráfico la variación térmica del conductor al ser sometido a las diferentes temperaturas a las que se ha realizado la simulación.

Tabla 5.2: Tabla de variación de temperatura

5°C	22°C	50°C
64,728	75,577	94,555
64,02	74,914	93,962
63,313	74,252	93,369
62,606	73,59	92,776
61,899	72,928	92,182
61,192	72,265	91,589
60,485	71,603	90,996
59,778	70,941	90,403
59,07	70,278	89,81
58,363	69,616	89,217
59,07	70,278	89,81
59,778	70,941	90,403
60,485	71,603	90,996
61,192	72,265	91,589
61,899	72,928	92,182
62,606	73,59	92,776
63,313	74,252	93,369
64,02	74,914	93,962
64,728	75,577	94,555

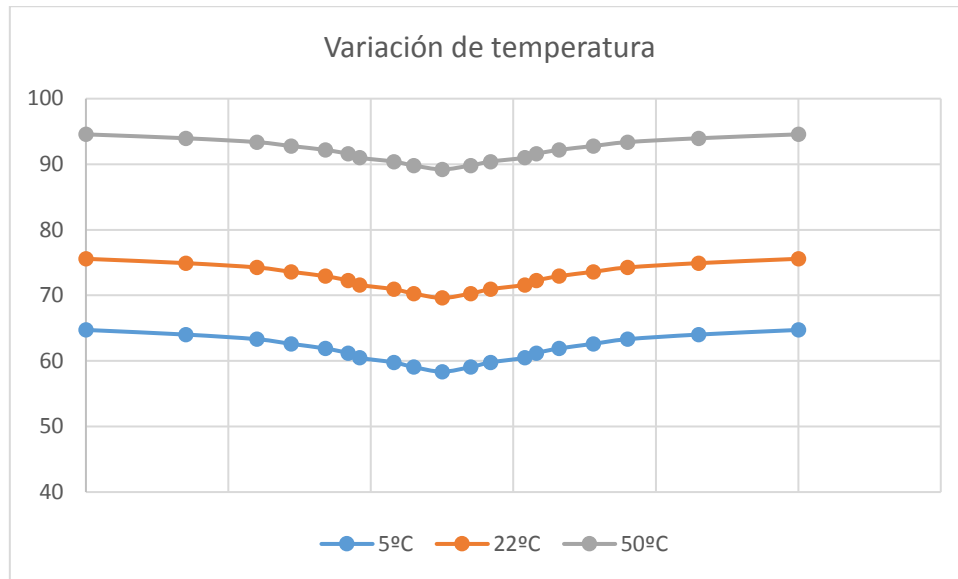


Figura 5.12: Gráfico comparativo de variación de temperatura

Como podemos ver en el gráfico anterior, se muestra como con el aumento de la temperatura de contorno de conductor se produce el correspondiente incremento de la temperatura del cable, siendo menor el incremento que se produce cuando nos encontramos en temperaturas más bajas que para valores más elevados de la misma.

5.2.3.- Análisis térmico en función de la incidencia del viento

En los siguientes supuestos se realiza la simulación del efecto que supondría la acción del viento sobre la temperatura que soportaría el conductor, siendo analizado para diversos coeficientes convectivos aplicados al mismo.

En el caso mostrado a continuación se muestra la incidencia que tendría sobre la temperatura del conductor un coeficiente convectivo de $10\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, siendo mostrado el gráfico de esquema térmico sobre el tramo de conductor analizado.

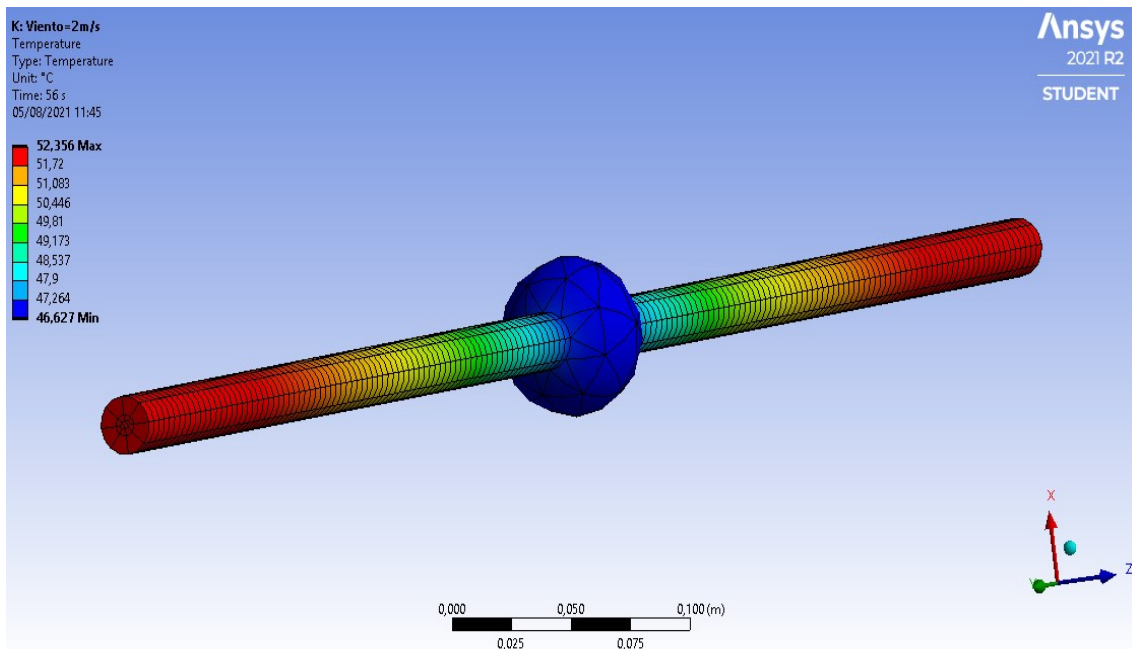


Figura 5.13: Diagrama térmico para Coef. Convectivo $10\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Para el siguiente caso se procederá a la simulación del efecto que supondría sobre el cable la acción de un coeficiente convectivo de $45\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, mostrándose a continuación el diagrama térmico sobre el conductor eléctrico.

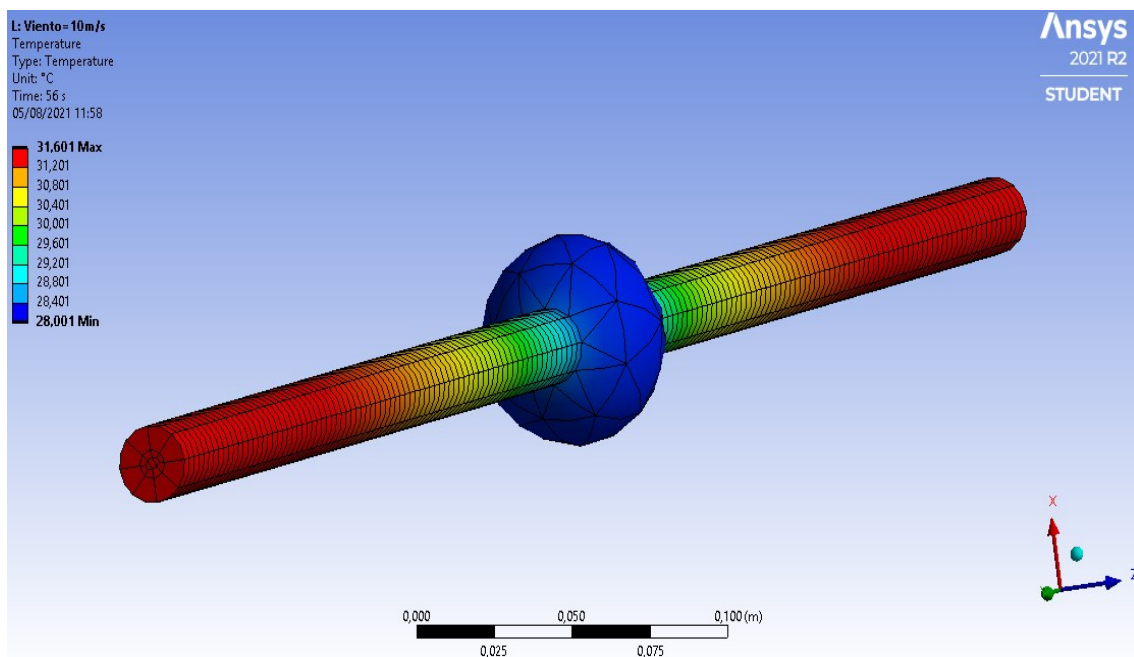


Figura 5.14: Diagrama térmico para Coef. Convectivo $45\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

A continuación, se realiza un análisis comparativo del supuesto original, junto con los dos casos planteados de acción del viento sobre el conductor eléctrico, siendo realizada mediante una tabla comparativa de los datos obtenidos de la simulación, así como un gráfico comparativo.

Tabla 5.3: Tabla de valor de temperatura por acción de viento

Aire natural	Coef. Conv.=10	Coef. Conv.=45
75,577	52,356	31,601
74,914	51,72	31,201
74,252	51,083	30,801
73,59	50,446	30,401
72,928	49,81	30,001
72,265	49,173	29,601
71,603	48,537	29,201
70,941	47,9	28,801
70,278	47,264	28,401
69,616	46,627	28,001
70,278	47,264	28,401
70,941	47,9	28,801
71,603	48,537	29,201
72,265	49,173	29,601
72,928	49,81	30,001
73,59	50,446	30,401
74,252	51,083	30,801
74,914	51,72	31,201
75,577	52,356	31,601

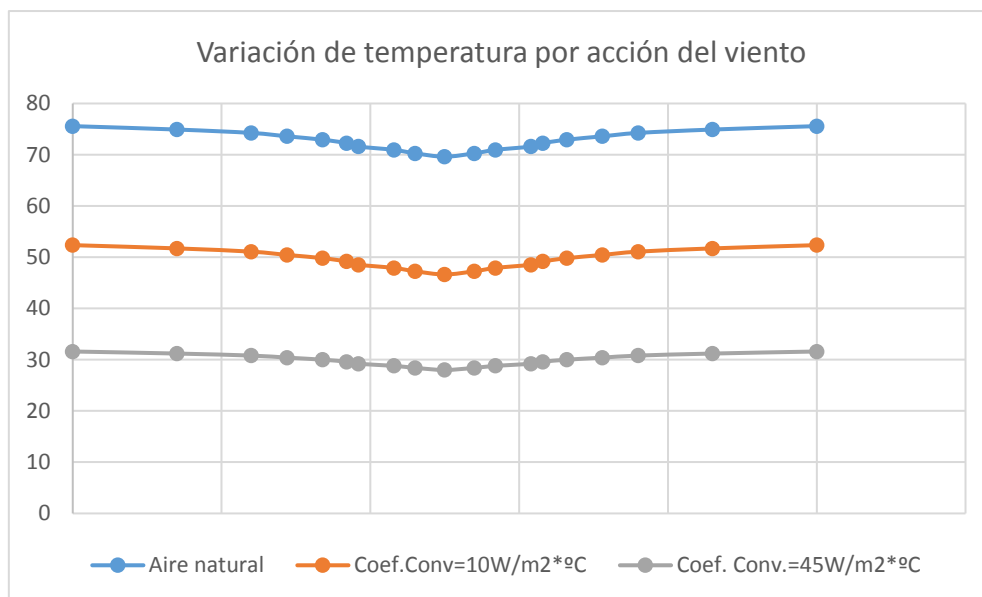


Figura 5.15: Gráfico comparativo de variación térmica según acción del viento

Como podemos ver en los datos mostrados en el gráfico anterior, la incidencia de una mayor o menor cantidad de viento afecta claramente a la temperatura soportada por el conductor, siendo mayor el descenso de temperatura a mayor velocidad de viento existente.

5.2.4.- Análisis térmico en función de la variación del cuerpo de medición térmico

En el siguiente supuesto se realiza la simulación de una posible variación de las dimensiones del cuerpo de medición térmica y cuál sería su influencia en la temperatura que alcanza el conductor.

Si tomamos como referencia el valor descrito en el supuesto inicial, de diámetro del cuerpo de medición térmico de 60 milímetros, se procederá a la simulación de otros dos casos posibles que serán para valores de diámetro de 90 y 120 milímetros del mismo, siendo los perfiles térmicos los mostrados a continuación.

Para el caso de 90 milímetros:

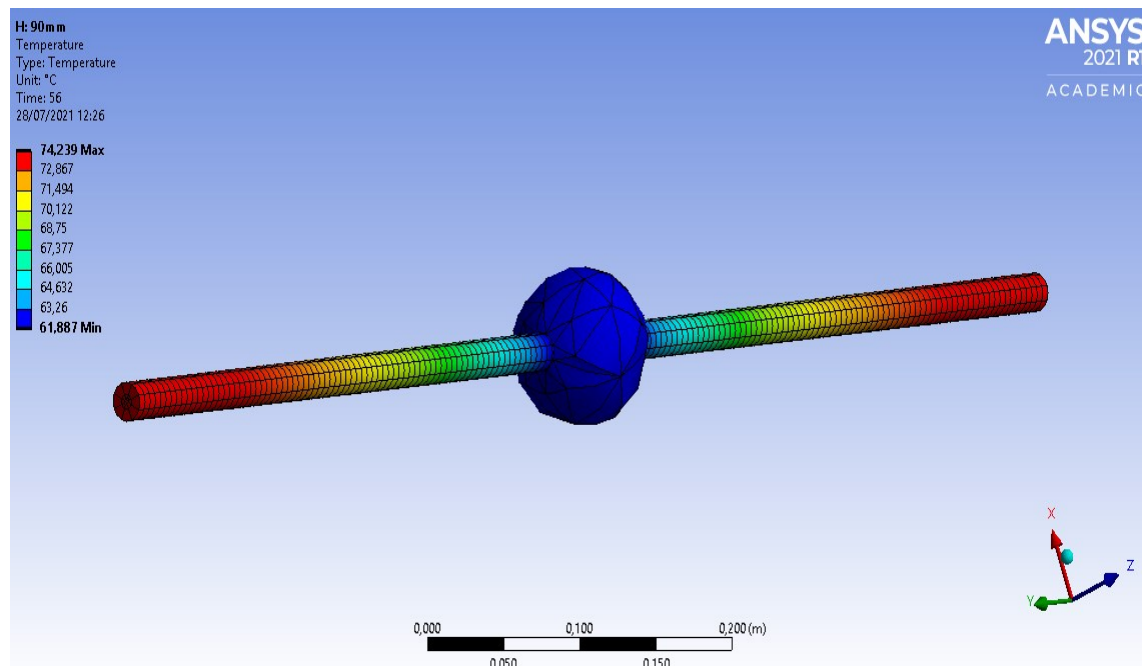


Figura 5.16: Diagrama térmico para diámetro 90mm

Para el caso de 120 milímetros:

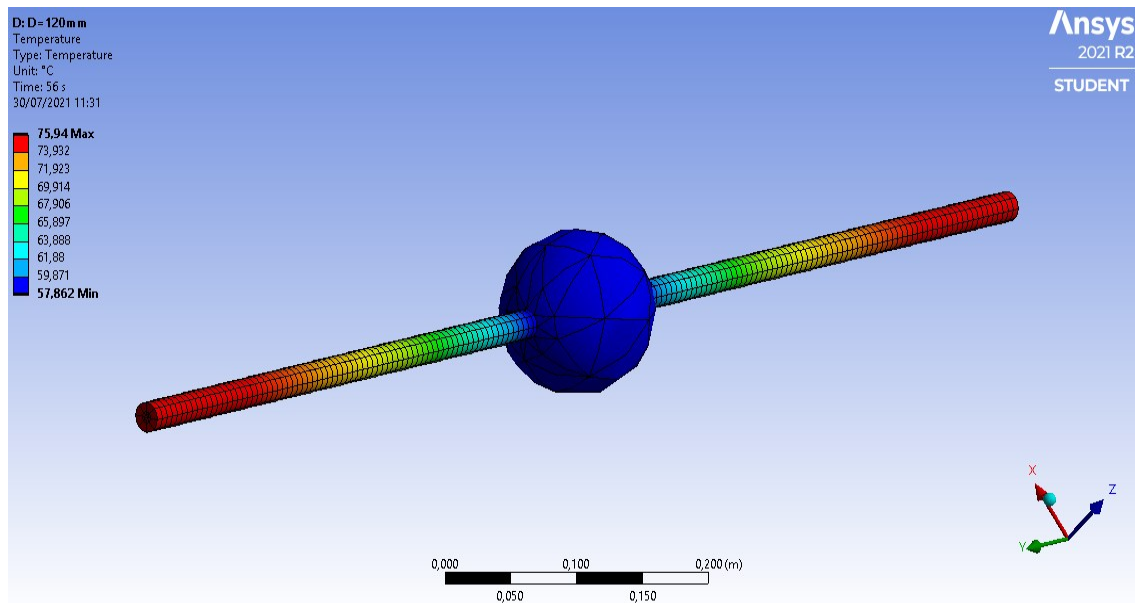


Figura 5.17: Diagrama térmico para diámetro 120mm

A continuación, se realiza un análisis comparativo del supuesto original, junto con los dos casos planteados de variación del diámetro del cuerpo de medición térmico sobre el conductor eléctrico, siendo realizada mediante una tabla comparativa de los datos obtenidos de la simulación, así como un gráfico comparativo.

Tabla 5.4: Tabla de valor de temperatura en función del diámetro del cuerpo de medición térmica

60mm	90mm	120mm
75,577	76,945	75,94
74,914	75,595	73,932
74,252	74,245	71,923
73,59	72,895	69,914
72,928	71,546	67,906
72,265	70,196	65,897
71,603	68,846	63,888
70,941	67,496	61,88
70,278	66,174	59,871
69,616	64,797	57,862
70,278	66,174	59,871
70,941	67,496	61,88
71,603	68,846	63,888
72,265	70,196	65,897
72,928	71,546	67,906
73,59	72,895	69,914
74,252	74,245	71,923
74,914	75,595	73,932
75,577	76,945	75,94

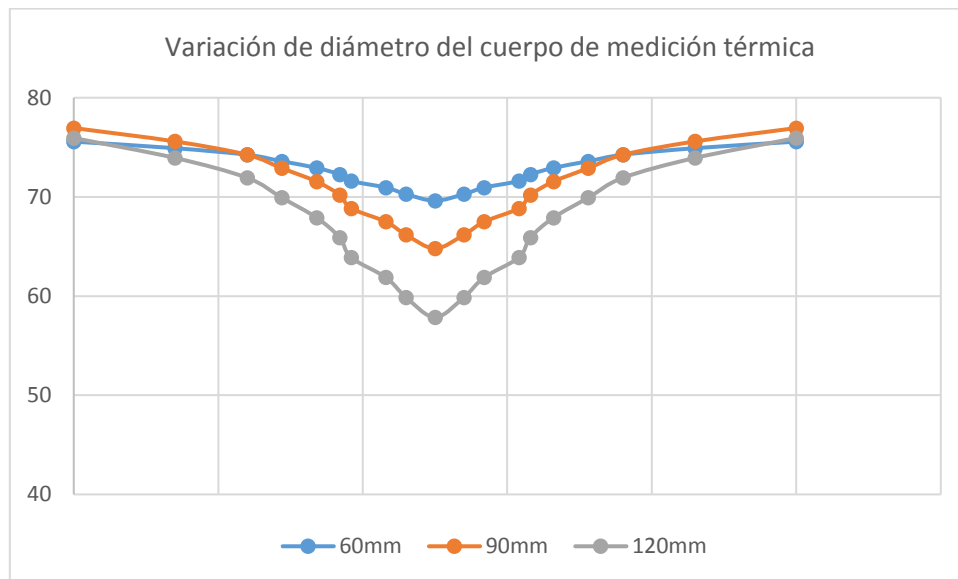


Figura 5.18: Gráfico comparativo de variación térmica según el diámetro del cuerpo de medición térmica

Como podemos observar la variación térmica al modificar el diámetro del cuerpo de medición térmica no es muy elevada en ninguno de los casos, pero a medida que se aumenta el diámetro la variación en la zona del cuerpo va aumentando lo que permite concluir que el valor más adecuado es el de diámetro de 60 milímetros ya que permite mayor estabilidad térmica.

5.2.5.- Análisis térmico en función de la variación de la caída de tensión

A continuación se planteará una variación en la caída de tensión que se produciría entre los dos extremos del tramo de conductor, permitiendo así comprobar los límites de temperatura según la especificación de temperaturas máximas descritas en los datos técnicos del conductor.

En primer lugar, se tomará una caída de tensión de 0,02 voltios en el tramo seleccionado del conductor y se comprobará la temperatura que alcanza el mismo.

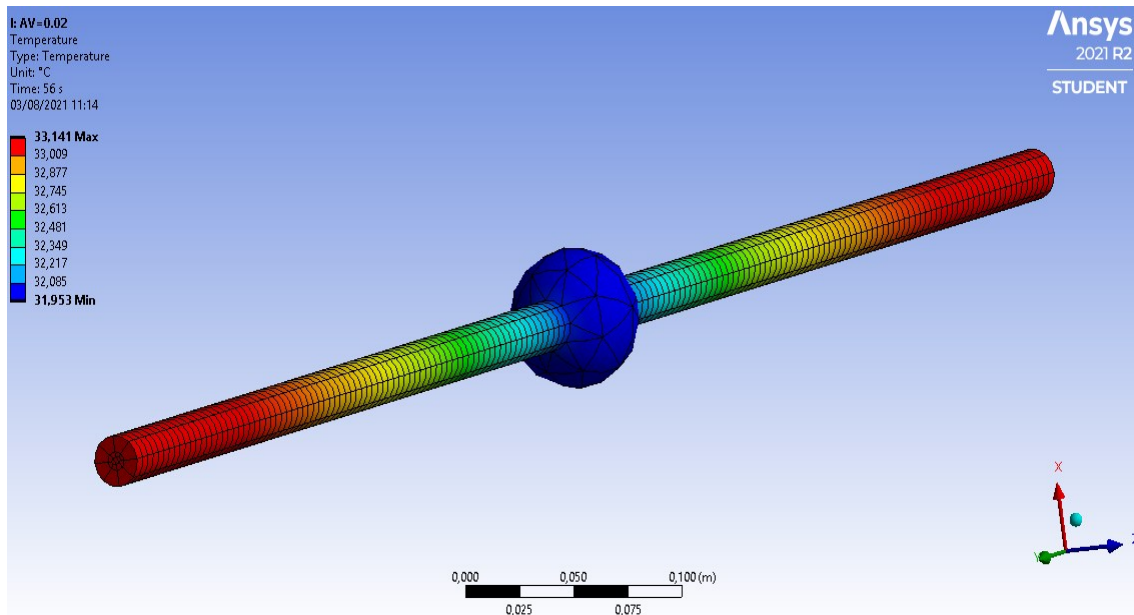


Figura 5.19: Diagrama térmico para caída de tensión de 0.02v

Como se puede ver al tratarse de una caída de tensión pequeña la temperatura que soporta el conductor es también pequeña respecto al supuesto original, del comienzo del planteamiento.

Para buscar un valor que se aproxime más al valor de límite térmico del conductor, se toma en este otro caso mostrado a continuación una caída de tensión del tramo de 0,07 voltios, siendo el resultado el mostrado a continuación.

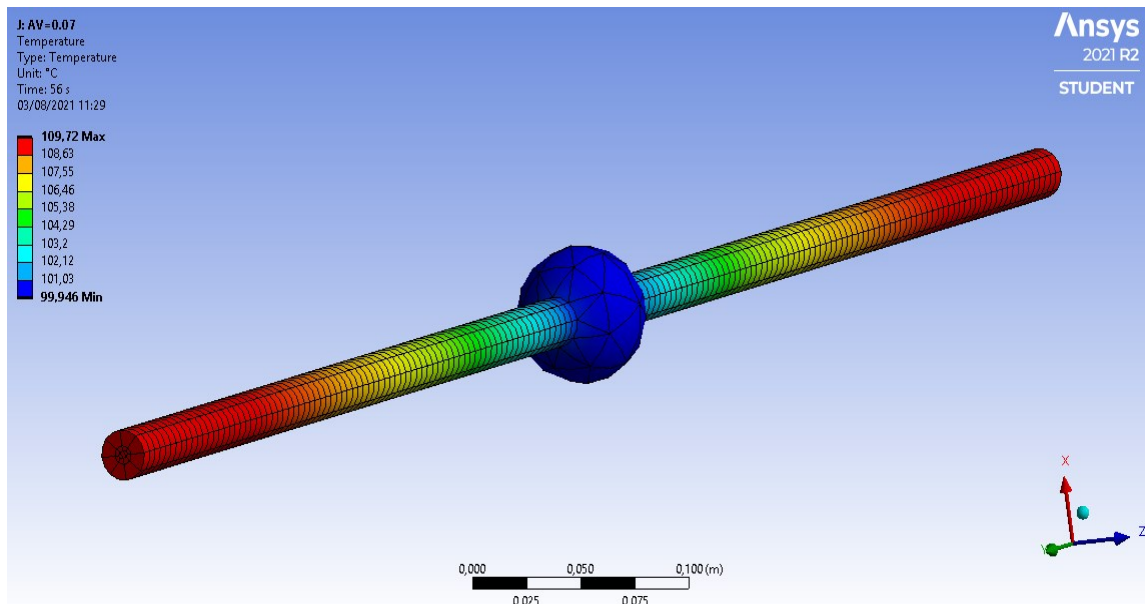


Figura 5.20: Diagrama térmico para caída de tensión de 0.07v

Como podemos ver en este caso las temperaturas que alcanza el conductor son bastante elevadas acercándose al límite térmico de diseño del conductor, lo que provocaría daños irreversibles en el mismo.

A continuación se muestra la tabla resumen de temperaturas en el tramo del conductor seleccionado en los dos últimos casos planteados así como en el caso de planteamiento original, así como un gráfico comparativo de la temperatura superficial del conductor en función de la caída de tensión soportada.

Tabla 5.5: Tabla de valor de temperatura en función de la caída de tensión

$\Delta V=0,02v$	$\Delta V=0,05v$	$\Delta V=0,07v$
33,141	75,577	109,72
33,009	74,914	108,63
32,877	74,252	107,55
32,745	73,59	106,46
32,613	72,928	105,38
32,481	72,265	104,29
32,349	71,603	103,2
32,217	70,941	102,12
32,085	70,278	101,03
31,953	69,616	99,946
32,085	70,278	101,03
32,217	70,941	102,12
32,349	71,603	103,2
32,481	72,265	104,29
32,613	72,928	105,38
32,745	73,59	106,46
32,877	74,252	107,55
33,009	74,914	108,63
33,141	75,577	109,72

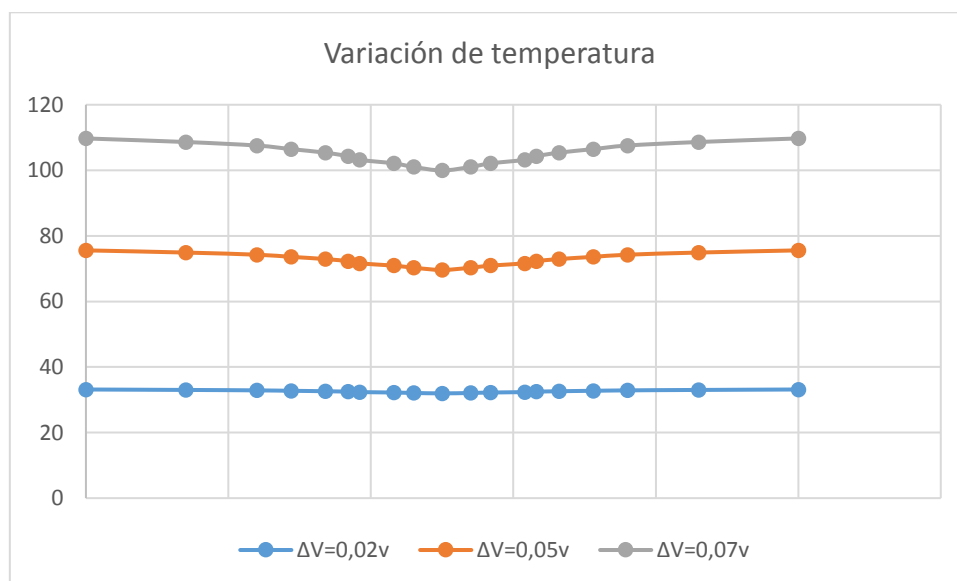


Figura 5.21: Gráfico comparativo de variación térmica según la caída de tensión

Se puede apreciar la gran importancia que tiene la variación de tensión en un tramo de conductor y consecuentemente la intensidad que circula por el conductor, siendo a mayor caída de tensión mayor la temperatura que alcanza el conductor y la principal causa de incremento de temperatura en el conductor eléctrico.

5.2.6.-Análisis térmico debido a la acción de la radiación solar

Para la realización de este análisis partiremos de que en el supuesto inicial no se añadió ningún flujo de calor que añadiera la presencia de la radiación solar. Partiendo de esta premisa se realizarán varios casos para ver la incidencia de la acción de la radiación solar sobre el conductor, siendo mantenidos el resto de los parámetros sin modificación.

En el supuesto que se muestra en el diagrama siguiente se realizará un incremento de la radiación solar hasta alcanzar los 200W/m^2 siendo mostrada en el diagrama la variación de temperatura asociada a este incremento.

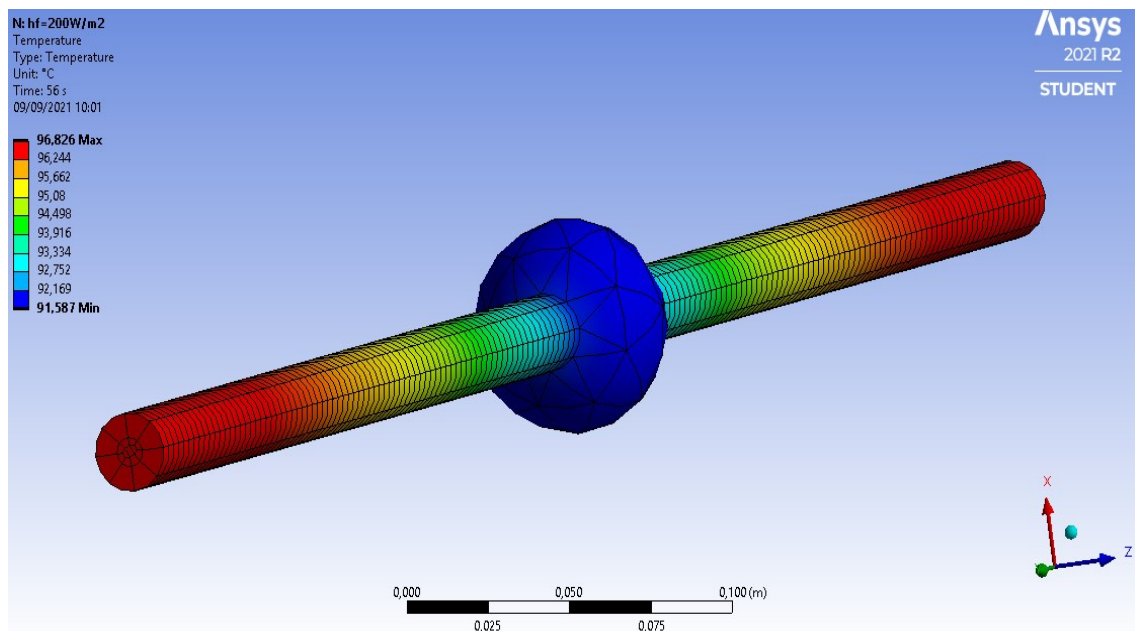


Figura 5.22: Diagrama térmico con radiación solar de 200W/m^2

Para el siguiente supuesto analizado se presenta un incremento de la radiación solar hasta alcanzar un flujo de calor añadido sobre el conductor de 500W/m^2 y mostrándose en el diagrama siguiente la distribución de temperatura que se produciría.

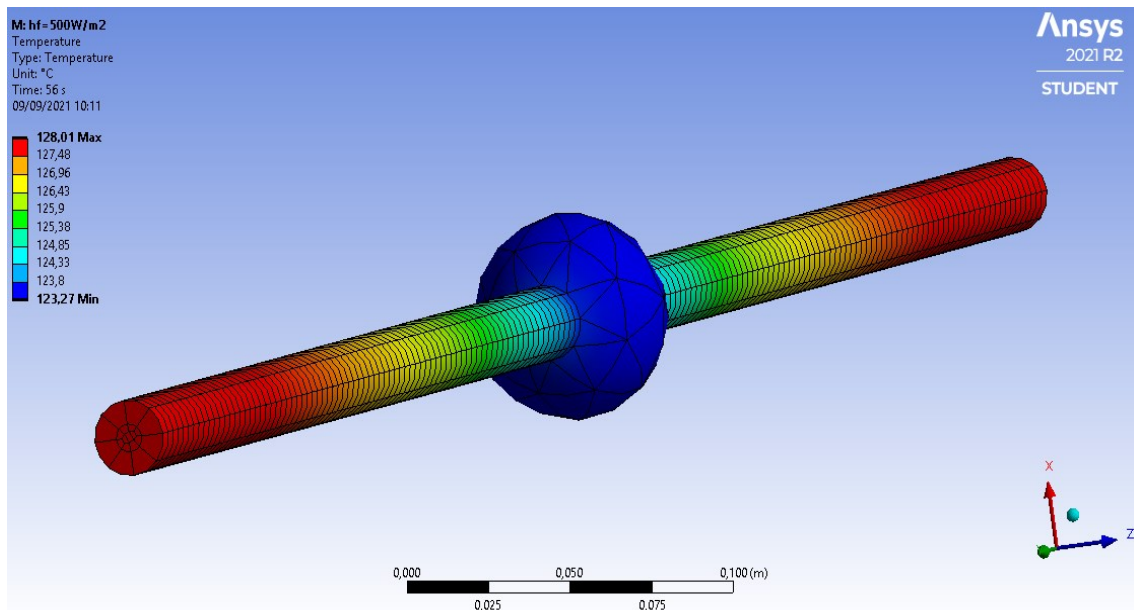


Figura 5.23: Diagrama térmico con radiación solar de 500W/m²

Por último realizaremos un análisis de un incremento de la radiación solar hasta un valor de 800W/m² y siendo mostrado el diagrama térmico resultante a continuación.

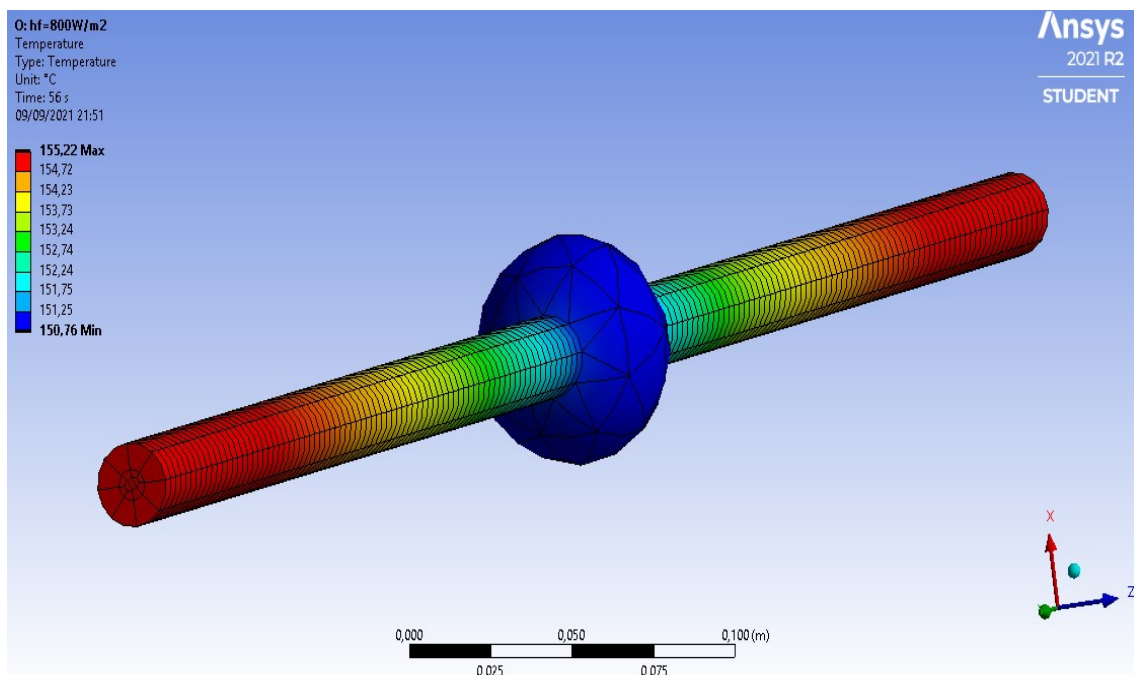


Figura 5.24: Diagrama térmico con radiación solar de 800W/m²

A continuación se muestra la tabla y el gráfico resumen de los diferentes planteamientos expuestos en los que se podrá ver claramente la variación existente debido a la radiación solar.

Tabla 5.6: Tabla de valor de temperatura en función de la radiación solar

Sin radiación	hf=200W/m2	hf=500W/m2	hf=800W/m2
75,577	96,826	128,01	155,22
74,914	96,244	127,48	154,72
74,252	95,662	126,96	154,23
73,59	95,08	126,43	153,73
72,928	94,498	125,9	153,24
72,265	93,916	125,38	152,74
71,603	93,334	124,85	152,24
70,941	92,752	124,33	151,75
70,278	92,169	123,8	151,25
69,616	91,587	123,27	150,76
70,278	92,169	123,8	151,25
70,941	92,752	124,33	151,75
71,603	93,334	124,85	152,24
72,265	93,916	125,38	152,74
72,928	94,498	125,9	153,24
73,59	95,08	126,43	153,73
74,252	95,662	126,96	154,23
74,914	96,244	127,48	154,72
75,577	96,826	128,01	155,22

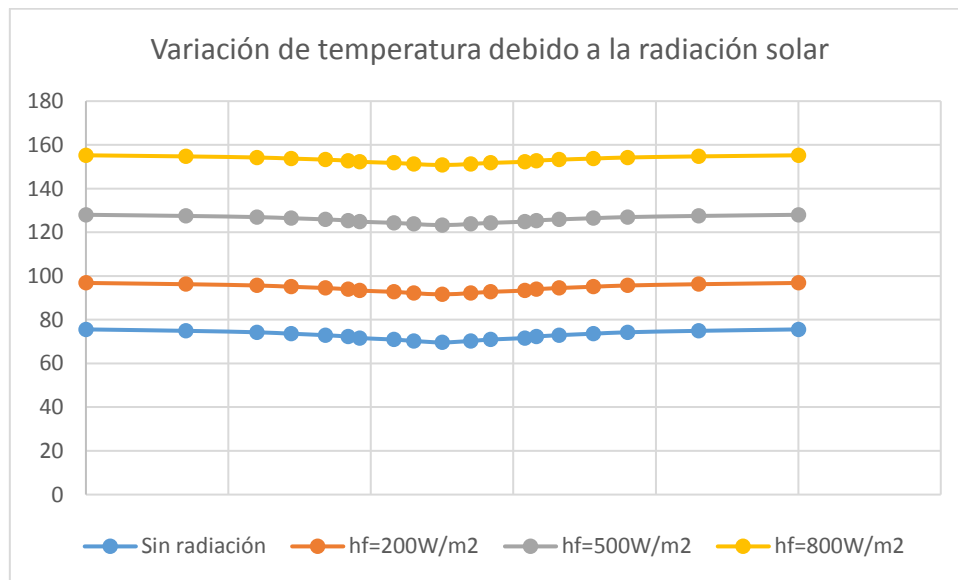


Figura 5.25: Gráfico comparativo de variación térmica según la radiación solar

Como se puede ver la variación va incrementándose a medida que aumenta la radiación solar pero de manera similar a lo largo del conductor y el cuerpo de medición térmico, incluso los dos últimos casos excederían el límite térmico del conductor para condiciones de emergencia.

6.-CONCLUSIONES

Tras la realización de las diferentes simulaciones de un conductor eléctrico a través del programa de cálculo ANSYS, con los diferentes supuestos propuestos en el análisis de la metodología de cálculo térmico en cables aéreos desarrollado por la Universidad de Cantabria se pueden llegar a diversas conclusiones a través del análisis del comportamiento del conductor, así como del método de simulación empleado mediante este programa.

6.1.-CONCLUSIONES TÉCNICAS DEL CONDUCTOR ELÉCTRICO

6.1.1.-Incidencia de condiciones meteorológicas

Tras la realización de los diversos ensayos de simulación a los que se ha sometido el conductor eléctrico, vemos como la variación de las condiciones ambientales afecta al mismo, teniendo gran importancia en la variación de la misma la incidencia, tanto de la temperatura, como la radiación solar o la de la acción del viento.

- Temperatura: La temperatura ambiente es una de los factores que más afectan al calentamiento del conductor, pero no es el mayor ya que si no se encuentra a una temperatura muy extrema el calentamiento que provocaría será relativamente bajo, lo que permitiría la maniobrabilidad de las líneas eléctricas.
- Acción del viento: El viento es un factor importante a tener en cuenta a la hora de conocer la situación de un conductor eléctrico aéreo ya que como se mostró en los supuestos planteados en el apartado de resultados el aumento del coeficiente convectivo contribuye al enfriamiento del conductor debido a la mayor circulación del flujo de aire en el entorno del mismo.
- Radiación solar: La radiación solar afecta considerablemente al calentamiento del conductor produciendo un aumento constante en función de la cantidad de radiación a la que este se ve sometido.

6.1.2.-Incidencia de aspectos técnicos

- Dimensiones del cuerpo de medición térmica: La acción que produce la variación del cuerpo de medición térmica se traduce en una mayor disminución de la temperatura en la zona que se sitúa, pero en las zonas con una moderada distancia al mismo, la incidencia de la variación de las dimensiones en la variación térmica es residual.
- Variación de la Caída de Tensión: La variación de la caída de tensión que se produce en el tramo de conductor eléctrico en el que se realiza la simulación, nos permite ver como es el parámetro que mayor importancia tiene a la hora de ver el calentamiento producido en el cable, ya que está totalmente relacionado con la intensidad que circula sobre el mismo, lo cual en el caso de aumentar la carga sobre una línea eléctrica nos determinará el nivel máximo de transporte de la línea, pudiendo producirse por dicha causa el deterioro del conductor.

- Variación de la emisividad: La variación de la emisividad del material del conductor puede ser un aspecto a tener en cuenta ya que una emisividad baja produciría un aumento de la temperatura que podría ser considerable.

6.2.-CONCLUSIONES FUNCIONALES DEL PROGRAMA DE CÁLCULO

Aunque el programa de cálculo ANSYS sea un programa empleado básicamente para la realización de cálculos estructurales, nos permite realizar una gran simulación de, en este caso, la situación térmica de un conductor eléctrico, permitiendo la inclusión de las diferentes variables que afectan al estado del mismo.

Al ser empleada en este caso una versión de estudiante, se producen ciertas limitaciones, como pueden ser:

- Realizar un mallado más exhaustivo.
- Realizar una mejor definición de la estructura.
- Mejorar la caracterización de los materiales empleados.

6.3.-OTRAS CONCLUSIONES

La realización de este trabajo me ha permitido desarrollar mis conocimientos en lo que respecta a las metodologías que se emplean a la hora de realizar el control sobre las líneas eléctricas para mejorar sus prestaciones, bien sea por una necesidad puntual, como podría ser debido a un fallo de línea, lo que provocaría una necesidad de aumento en otras para dotar de suministro en ese momento, como podría ser la evacuación de una gran potencia eléctrica en zonas de producción aumentando las posibilidades sobre las líneas de transporte existentes. Además me ha permitido conocer una herramienta muy potente de cálculo como es el programa ANSYS y sus diferentes posibilidades.

7.-BIBLIOGRAFÍA

Para la realización de este trabajo han sido necesarias diferentes referencias bibliográficas las cuales son reseñadas a continuación.

- 1) Página web de Red Eléctrica de España: "www.ree.es".
- 2) "Informe del Sistema Eléctrico Español 2019" Red Eléctrica de España.
- 3) Página web "www.aeeolica.org".
- 4) Página web de la empresa Axiomet: "www.axiomet.eu".
- 5) Página web "www.enviraiot.es".
- 6) Página web de la empresa Testo: "www.testo.com".
- 7) Norma "IEEE 738 de 2013" "Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity Under Steady-State Conditions".
- 8) Norma CIGRE WG 22.12 "The thermal behaviour of overhead conductors"
- 9) Patente de título "Método y sistema para la medición directa y sin contacto de la temperatura superficial en un cable". Universidad de Cantabria.
- 10)"Guide for Application of Direct Real-Time Monitoring Systems"
- 11) Planilla de datos técnicos conductor ACSR "LA 280 HAWK" (ECN Cable Group).